LOS 10 DESCUBRIMIENTOS PRINCIPALES DEL HUBBLE • ¿QUE VEN LAS AVES?

INVESTIGACION y CIENCIA

SEPTIEMBRE 2006
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CELULAS MADRE, ¿CULPABLES DEL CANCER?

PROCESAMIENTO CUANTICO DE LA INFORMACION

ECONOMIA DEL HIDROGENO

REALIDAD Y FICCION DE LA CIENCIA FORENSE

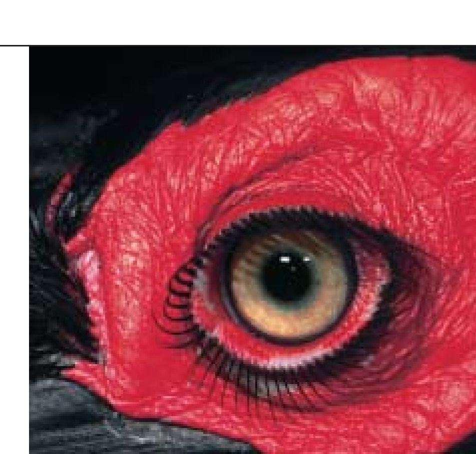




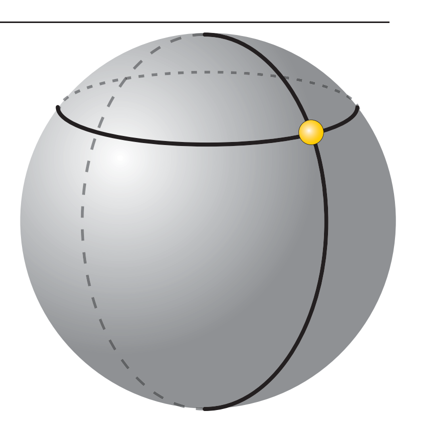
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Septiembre de 2006

Número 360

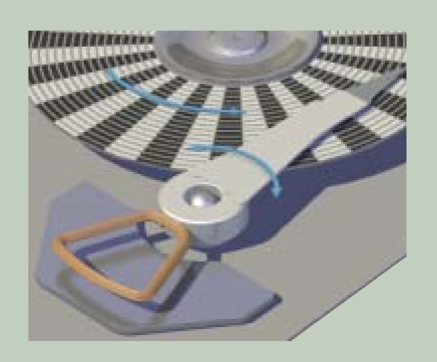



CSI













DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

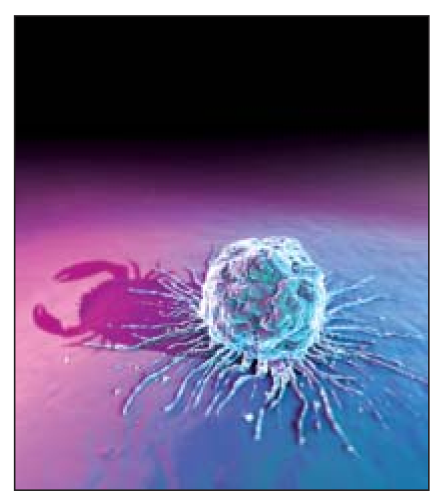
Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Toma de decisiones en enjambres*, *Superlentes y supermateriales*; M.ª Rosa Zapatero: *Los 10 descubrimientos principales del Hubble*; José Manuel González Mañas: *Células madre, ¿culpables del cáncer?*; Joandomènec Ros: *¿Qué ven las aves?*; Marián Beltrán: *Realidad y ficción de la ciencia forense*, *Desarrollo sostenible*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; M.ª Rosa Vallès: *Ciencia y gastronomía*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Jeff-Johnson, *Hybrid Medical Animation*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

EL UNIVERSO EN EVOLUCIÓN. «Hemos repasado las preguntas que dominaron la mente de los cosmólogos durante la primera mitad de este siglo: la concepción de un continuo espacio-tiempo tetradimensional, de un espacio curvo, de un universo en expansión y de un cosmos que es finito o infinito. Debemos considerar ahora el tema candente de la cosmología: ¿Está el universo en evolución o bien se halla en un estado estacionario de equilibrio que ha existido desde siempre y que seguirá así por toda la eternidad? La mayoría de los cosmólogos comparten la opinión evolucionista. —George Gamow»

EL UNIVERSO ESTACIONARIO. «La teoría de un universo estacionario desemboca en no pocas conclusiones asombrosas: que el universo no tuvo principio ni tendrá fin, que el espacio y también el tiempo son infinitos y que en todo el espacio se crea materia continuamente, por citar sólo algunas. Siendo como es la naturaleza humana, nos hemos mostrado propensos a adoptar actitudes emocionales en torno a estos conceptos, en vez de limitar la discusión a criterios puramente científicos. Si a este respecto el autor, y sus críticos, ha traspasado los límites, promete compensarlo en parte en este artículo. La teoría estacionaría sostiene que las características a gran escala del universo no varían con el tiempo. Solo varían las galaxias y las agrupaciones de galaxias. —Fred Hoyle»

...cien años

SCOTT DE LA ANTÁRTIDA. «Gran Bretaña puede sentirse satisfecha con la información recogida en la Antártida por el capitán Robert F. Scott y sus intrépidos compañeros. ¿Y que halló el capitán Scott tras su memorable pugna con el glaciar al atravesar las montañas? Una enorme meseta a una altitud de unos 2800 metros, casi llana, lisa y sin relieves, por la que se adentró más de 300 kilómetros, sin que al final de ese recorrido se viesen indicios de que el paisaje empezara a variar.»

INGENIO CONTRABANDISTA. «El alcohol es, sin duda, el artículo que más se contrabandea en los accesos a París. Un solo hombre puede transportar gran cantidad de alcohol, en un sentido en buena medida distinto del que se aplica a los borrachos. Un caballero elegantemente trajeado puede portar, bajo un chaleco y una camisa blanca impecables, un peto rebosante de alcohol. Cierto que su aspecto es algo voluminoso, pero luego probablemente apuntará las molestias al debe de la buena vida. He conocido incluso un sombrero de copa inmaculado que encerraba un licor fuertemente gravado. —Por un funcionario de la Aduana de París»



Contrabandista adinerado con alcohol oculto en la chistera, 1906

...ciento cincuenta años

ANTES DE *EL ORIGEN*. «Lorenz Oken y el autor de “Vestigios de la Creación” han acometido la demostración de que las distintas razas animales que hoy existen corresponden a productos de la evolución, no a creaciones independientes, y que la vida en nuestro planeta, a través de incontables edades, fue mejorando gradualmente —evolucionó— hasta sus diversificadas y amplísimas perfecciones actuales. Hugh Miller refutó por completo esta teoría, por cuanto se refiere a que *toda* la vida comenzó en un *punto*, a partir del cual se desarrolló hacia arriba. Con todo, admite, en “Las huellas del Creador”, que las creaciones sucesivas de las razas muestran evoluciones, y lo mismo hace Louis Agassiz, con lo que ambos dan la razón, al menos a medias, a quienes creen en la evolución gradual de la vida desde un corpúsculo hasta el hombre.»

ESPEJISMO DE GUANO. «Se anunció hace algún tiempo el descubrimiento en el océano Pacífico de una isla de guano, no registrada en mapa alguno, por parte de uno de nuestros barcos mercantes. Se ordenó a la balandra de la Armada *Independence* que hiciera un ojeo en esas islas. El capitán Mervin informa: “Un intenso interés pareció impregnar todas las mentes, de proa a popa, conforme el buque se acercaba al prometido Eldorado de los intereses mercantiles y agrícolas de nuestro país. Pero la ilusión fue del todo pasajera; una vista cercana reveló a nuestros asombrados ojos un conjunto de islas cubiertas de un verde manto de vegetación exuberante, indicadora ciertamente de la fortaleza del suelo y lo copioso de las lluvias habitual en esa latitud, así como de la falta de valor comercial de los sedimentos”.»

APUNTES

SALUD

¿Empeora el dolor artrítico con el tiempo húmedo?

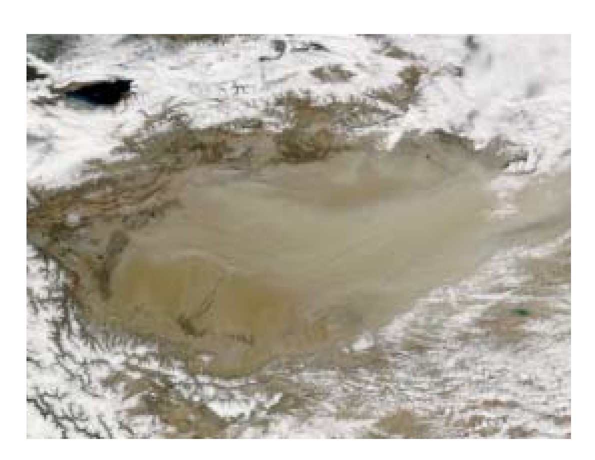
Pese a la tan generalizada creencia en que la humedad contribuye a los dolores articulares, decenios de investigaciones médicas no ponen de manifiesto relación objetiva alguna entre la severidad de la artritis y el tiempo atmosférico. La condensación, las disminuciones de la presión barométrica y una alta humedad son las características meteorológicas que, según algunos, contribuyen a los brotes de dolor artrítico, pero cambios ambientales similares que se experimentan en otras situaciones no parecen afectar de modo alguno a los artríticos. No experimentan cambios drásticos en los síntomas al bañarse o al nadar. Toleran cambios de presión mucho mayores durante un viaje en avión que los que puedan encontrar durante una tormenta. Y los pacientes hospitalizados que respiran aire humidificado sufren escasos efectos que se sepa. Con todo, ninguno de los estudios efectuados hasta la fecha sobre la relación entre el tiempo atmosférico y el dolor artrítico es perfecto; la investigación ni ha descartado del todo esa conexión ni la ha ratificado. Para probar un vínculo causal hacen falta observaciones imparciales en las que ni los pacientes ni los médicos supieran si se estaba produciendo la exposición investigada. Unos y otros tendrían que desconocer el tiempo que hiciese, algo muy difícil. Sugieren algunos estudios que las personas observan patrones incluso donde no existe ninguno. Por casualidad, a algún día lluvioso le siguen dolores, afianzando la creencia en la relación. Tales creencias revelan más sobre la mente que sobre el cuerpo.

—Donald A. Redelmeir,
Universidad de Toronto

GEOLOGIA

Del Mediterráneo al Tíbet

El desierto de Taklimakan, o Taklamakan, se encuentra en el centro de Asia, entre dos ramas de la Ruta de la Seda. Ocupa más 300.000 de kilómetros cuadrados de la cuenca endorreica —es decir, que no desagua las agua que recoge— de Tarim, en el extremo noroccidental de China. En un 85 por ciento está formado por dunas móviles; es el segundo desierto más grande del mundo de ese tipo. No hay acuerdo unánime acerca de su antigüedad. Las opiniones van desde los que le atribuyen tres millones y medio de años hasta los que le conceden sólo unos cientos de miles. Dos geólogos chinos sostienen ahora en *Science* que hace 5.300.000 años la cuenca de Tarim ya estaba cubierta por las dunas. Proponen, además, una explicación de la formación del desierto que vale como buen ejemplo de encadenamiento de fenómenos geofísicos a escala continental. Entre hace 5.600.000 y 5.300.000 años el Mediterráneo quedó aislado y la salinidad mundial de los mares se redujo en un seis por ciento. Este episodio debió de facilitar la formación de hielos a latitudes elevadas. El consiguiente enfriamiento en esas regiones boreales debió de intensificar el anticiclón siberiano, con el consiguiente efecto en el clima de China y Mongolia. Por otra parte, de sus propias investigaciones deducen que la meseta del Tíbet, al sur del desierto, no se elevó de golpe a lo largo de toda su extensión. Aunque su región central ya estaba a 4 kilómetros de altura hace decenas de millones de años, la parte septentrional todavía pudo elevarse hace 5.300.000 millones de años, y así habría alterado la circulación atmosférica en esas zonas del continente.



El desierto de Taklimakan, en China, fotografiado por el satélite Aqua el día 26 de marzo 2004, durante una tormenta de arena.

JEFF SCHMALTZ, *MODIS Rapid Response Team,* NASA/GSFC

MEDICINA

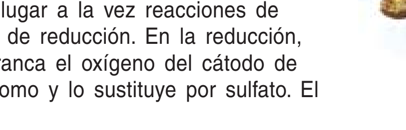
Medicaciones fatales

Un informe, titulado “Errar es humano”, hacía saber en 1999 que cada año morían en Estados Unidos casi cien mil personas por culpa de los errores médicos. Conmocionó, pero no parece que se extrajera lección alguna. El Instituto de Medicina, de la Real Academia de Ciencias de Estados Unidos, acaba de publicar un nuevo informe, “Prevenir los errores de medicación”, que cita el número de “sucesos adversos con medicamentos” evitables que al año se producen allí: 380.000 o 450.000 en los hospitales, 800.000 en las unidades de cuidados de larga duración, 530.000 entre los jubilados no hospitalizados. Para el informe, los números se quedan cortos. El comité redactor concluye que hay al menos millón y medio de esos incidentes al año, pero se inclina a creer que la cifra real es mucho mayor. Un hospitalizado ha de esperar que sufrirá al menos un error de medicación al día. Propone el informe algunas medidas para rebajar el número de incidentes: que los médicos se asesoren con medios informáticos en el momento de prescribir una medicación, que escriban las prescripciones también electrónicamente, un mejor etiquetado de los fármacos y, sobre todo, que se involucre a los pacientes en su propio tratamiento.

ELECTRICIDAD

¿Cómo se cargan y se descargan las baterías?

Las baterías constan de una o varias pilas electroquímicas, compuestas de dos electrodos separados por una cierta distancia. Llena ese espacio un electrolito, es decir, un líquido o sólido que contiene partículas dotadas de carga, o iones. Uno de los electrodos —el ánodo— emite electrones. El otro —el cátodo— los recibe. Las diferencias químicas entre ambos electrodos crean un salto de energía, o diferencia de potencial, que impulsa a los electrones a moverse desde el ánodo hacia el cátodo a través del electrolito. En el caso particular de los acumuladores de plomo se emplea un cátodo de óxido de plomo, un ánodo de plomo y un electrolito líquido de ácido sulfúrico. El ácido sulfúrico proporciona un medio que altera los enlaces químicos del plomo y el óxido de plomo, de manera que tienen lugar a la vez reacciones de oxidación y de reducción. En la reducción, el ácido arranca el oxígeno del cátodo de óxido de plomo y lo sustituye por sulfato. El ion óxido se combina entonces con hidrógeno (procedente del ácido) y forma agua. En la oxidación, el ácido sulfúrico expulsa dos electrones del plomo y se liga a éste, formando sulfato de plomo. Si la batería está unida a un dispositivo que deba alimentar, los electrones reemplazados por el sulfato salen de la pila para entrar en el dispositivo; así se crea una corriente eléctrica. El proceso se detendrá cuando uno de los electrodos, o los dos, agoten los compuestos que desencadenan las reacciones de oxidación/reducción. En una batería no recargable, la reacción química que crea la energía no es fácilmente reversible; cuando se agotan los reactivos, la pila se inutiliza. En las baterías recargables, así las de ácido y plomo recién descritas, la reacción es reversible: una fuente externa de corriente continua obliga a los electrones a fluir desde el cátodo hacia el ánodo hasta que la pila se recarga.



—Kenneth Buckle, Centro de Estudios sobre Fabricación Integrada, Instituto de Tecnología de Rochester

FISICA CUANTICA

A 144 kilómetros de distancia

Según la física clásica, todas las variables que describen un sistema físico toman a la vez valores determinados. Esta propiedad parece tan consustancial a la realidad, que la única razón de que se repare en ella es que no sea cierta a escala atómica. Según la mecánica cuántica, sólo algunas de esas variables podrán tener a la vez un valor determinado; las otras sufrirán una inevitable dispersión estadística. Más aún: si un sistema que consta de al menos dos partes tiene un valor determinado de cierta variable, lo que impondrá una correlación estricta entre los valores de esa variable para cada parte, las mediciones de variables que no puedan tomar un valor fijo al mismo tiempo que aquella pero aplicadas a cada componente arrojarán resultados entre los que habrá, pese a su aleatoriedad, cierta correlación aun cuando ambas partes se hayan separado hasta el punto de que ya no pueda haber conexión causal entre ellas. Y esa correlación será tal, que no podrán explicarla variables clásicas que hubiera ocultas y se hubiesen correlacionado cuando ambos sistemas estaban juntos. Este fenómeno, el "entrelazamiento" cuántico, se da sea cual sea la separación de los sistemas. En principio, podrían mediar vacíos intergalácticos entre ellos. O al menos eso dice la teoría. Con las fibras y detectores actuales no parece que pueda conservarse el entrelazamiento en distancias de más de cien kilómetros. Mediante la propagación de fotones por el aire libre se puede, sin embargo, superar ese límite, pero hasta ahora la máxima distancia en que se había verificado el entrelazamiento por esa vía era de 13 kilómetros. Ahora, el equipo de Anton Zeilinger ha llegado a los 144 kilómetros: lo han logrado gracias a una fuente de gran calidad de pares de fotones con polarización entrelazada, instalada en el observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma, desde donde se emitió un fotón de cada pareja hasta el telescopio Estación Optica Terrestre, de la Agencia Espacial Europea, situado en el observatorio del Teide.

OPTICA

Censura videofotográfica

Los sensores, o dispositivos acoplados a la carga, de las cámaras digitales, fotográficas o de video, son retrorreflectores: devuelven la luz que les llega directamente a su punto de partida, en vez de dispersarla. Un grupo del Instituto Tecnológico de Georgia (Estados Unidos) ha elaborado un prototipo que rastrea una zona con haces de luz visible —más adelante podría ser infrarroja—. Dos cámaras captan sus reflejos; cuando reciben alguno que se parece a un sensor digital se interpreta que se ha encontrado una cámara intrusa. El sistema dispara entonces un haz intenso hacia ésta, para cegarla. Uno de los principales usos de este invento consistiría en impedir la grabación pirata de películas mediante cámaras de vídeo introducidas en los cines. Podría emplearse también en salas iluminadas, para inutilizar cámaras compactas de fotos con las que se pudiera hacer espionaje industrial: sus sensores se hallan más cerca de la lente que en las cámaras de vídeo, con lo que es más fácil detectarlos que los de éstas cuando no hay oscuridad. Este método, en cambio, no sería aplicable a las cámaras de película o a las réflex digitales, cuyos sensores quedan ocultos por el espejo móvil del visor, salvo en el momento mismo del disparo.

—Charles Q. Choi

La hoja informativa del Instituto de Georgia da una idea del mérito de un sistema para cegar cámaras allí inventado: serviría para impedir que en un centro comercial el público tomase fotos de los niños con Papá Noel; así, tendrían que comprar fotos de pago.

MATT COLLINS (*arriba*); YOSHIKAZU TSUNO *AFP/Getty Images* (*abajo*)

Toma de decisiones en enjambres

Cuando 10.000 abejas buscan una nueva morada, ¿cómo resuelven, en una decisión colectiva, dónde instalarse?

Thomas D. Seeley, P. Kirk Visscher y Kevin M. Passino

El problema de la decisión colectiva ha tenido en jaque durante siglos a sociólogos y politólogos. En los grupos, el dilema fundamental para la toma de decisiones estriba en traducir a una sola las varias preferencias que los individuos puedan tener sobre los posibles resultados y en que tal decisión sea aceptada por el grupo entero. Este problema se ha estudiado, sobre todo, en lo concerniente a los grupos humanos, que han desarrollado un abanico de procedimientos de votación para singularizar una sola opción de entre una lista de elecciones posibles: las reglas de mayoría absoluta o de mayoría simple, sistemas de votación ponderada, etcétera. Menos se ha estudiado la decisión social en grupos animales, a pesar de la abundancia de ejemplos: una horda de babuinos decide hacia donde dirigirse después de un período de descanso; una colonia de hormigas decide si ataca o no a otra colonia vecina.

La elección del lugar de anidamiento por un enjambre de 10.000 abejas ofrece un llamativo ejemplo de toma de decisiones en un grupo animal. Este proceso entraña la intervención de varios centenares de abejas del enjambre: colaboran para hallar una docena o más de cavidades adecuadas en los árboles; luego seleccionan la mejor opción para instalar su nueva morada. Los autores vienen investigando este proceso desde hace diez años, valiéndose para ello de una gavilla de estudios de observación, experimentación y modelización matemática. Tales trabajos han revelado que el enjambre cuenta con mecanismos conductuales que producen de forma sistemática decisiones colectivas excelentes. Inteligencia grupal, que constituye un producto del desacuerdo y la competición —no del consenso y la componenda— entre varios grupos de abejas que presentan posibilidades distintas ante el problema en cuestión. La evolución ha suministrado una solución harto curiosa al problema de lograr que un grupo opere como unidad eficaz de toma de decisiones.

Trabajos precursores

Los apicultores saben desde hace siglos que, en las postrimerías de la primavera o comienzos del verano, las colonias de abejas se escinden por *enjambrado*. En este proceso, la reina y alrededor de la mitad de las obreras abandonan la colmena para fundar una nueva colonia; entre tanto, la reina hija y el resto de las obreras permanecen donde están para perpetuar la antigua colonia. Se sabía también que una vez que un enjambre abandona su colmena materna, las abejas se apiñan formando una especie de barba en una rama de algún árbol cercano, inspeccionan los alrededores en busca de nueva vivienda y, por fin, acaban alzando el vuelo y trasladándose todas juntas hasta su nueva morada, que suele ser un árbol hueco distante.

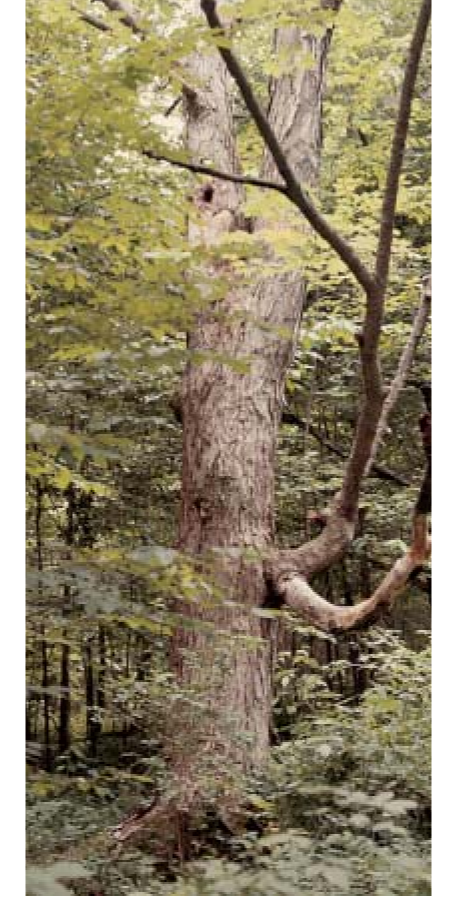
Desde hace mucho, los colmeneros han capturado a los enjambres que han descubierto vivaqueando y los han instalado en colmenas de factura humana, cortando de raíz la búsqueda de alojamiento emprendida por las abejas. Por ello, no resulta sorprendente que este proceso de toma de decisiones haya permanecido oculto durante largo tiempo.

La situación empezó a cambiar en los años cincuenta del siglo pasado cuando Martin Lindauer, zoólogo alemán, publicó un artículo seminal sobre la búsqueda de vivienda por las abejas melíferas. Lindauer completaba entonces su formación posdoctoral en la Universidad de Múnich con el etólogo Karl von Frisch, quien poco antes había descodificado la *danza del vientre* ("waggle dance") de las abejas (movimiento oscilante del abdomen).

Mediante este comportamiento comunicador, las merodeadoras más afortunadas informan a sus compañeras de la colmena de la ubicación de ricas fuentes de alimento. La abeja danzarina avanza volando y efectúa una *pasada de contoneo* ("waggle run"), haciendo vibrar su abdomen hacia los lados; después describe un círculo de regreso a su punto de partida. En eso consiste un circuito de danza. Una danza consta de varios circuitos. Von Frisch des-



1. UN ENJAMBRE DE UNAS 10.000 OBRERAS Y UNA REINA vivaquea en la rama de un árbol. La tarea de buscar un nuevo asentamiento donde anidar se delega en unos pocos cientos de abejas; durante el proceso, el resto permanece quiescente para conservar energía. La forma en que las exploradoras seleccionan los posibles alojamientos, deliberan sobre las opciones candidatas y alcanzan un veredicto constituye un proceso cuya complejidad rivaliza con la de las deliberaciones de una comisión decisoria humana. Una vez las exploradoras han elegido su nuevo hogar, estimulan al enjambre para que levante el vuelo; después lo guían hasta el nuevo domicilio.





2. LAS ABEJAS MUESTRAN CIERTAS PREFERENCIAS "INMOBILIARIAS". Se inclinan por cavidades situadas a una altura considerable sobre el suelo, con una capacidad de unos 20 litros cuando menos, a las que se acceda por un agujero situado en la base de la cavidad, cuya sección no pase de 30 centímetros cuadrados y esté orientado hacia el sur. En este árbol (*izquierda*), la entrada corresponde al agujero de un nudo, en la bifurcación izquierda del tronco. Al talar el árbol, el nido de su interior quedó a la vista (*derecha*).

THOMAS D. SEELEY/*American Scientist*

cubrió que la longitud de la pasada de contoneo representaba la distancia hasta la fuente de alimento; el ángulo de la danza denotaba la dirección en que se encontraba el alimento.

Lindauer era un observador atento y perspicaz. En cierta ocasión en que estudiaba un enjambre que se había establecido en el jardín del Instituto Zoológico, observó que unas abejas de la superficie del enjambre estaban ejecutando danzas ventrales. A diferencia de las del interior de una colmena, estas danzarinas, que permanecían sobre el enjambre, no portaban cargas de néctar ni de polen. No parecían, pues, abejas forrajeras que estuvieran dando a conocer provechosas fuentes de alimento. ¿Podría tratarse de exploradoras, que estuviesen informando de posibles asentamientos nuevos? Había descubierto una danza ventral de finalidad desconocida hasta entonces.

Lindauer dilucidó esta cuestión a partir de la observación paciente de todas las danzarinas de varios enjambres, una tarea maratoniana que le obligó a muchos días de vigilancia constante y de frenética toma de notas. Cada vez que veía a una nueva abeja danzante, Lindauer anotaba la ubicación que codificaba en su danzar y marcaba a la abeja con una mancha de pintura, para no registrar más de una vez la información contenida en su danza.

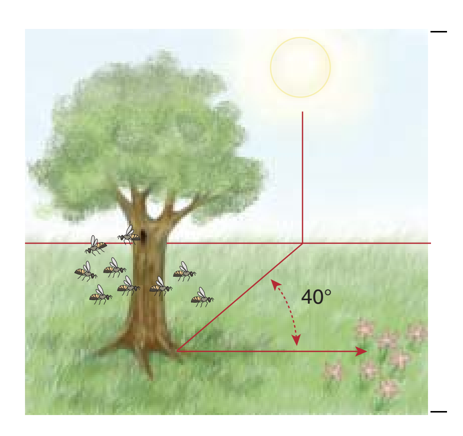
Este concienzudo trabajo fructificó en varios hallazgos notables. Así, durante el proceso de toma de decisiones, sólo unos centenares de entre los miles de abejas del enjambre se mostraban activas: volaban hacia y desde el enjambre, en busca de sitios donde anidar; después danzaban. La mayoría de las abejas permanecía inmóvil —con toda probabilidad, para conservar la provisión de energía del enjambre— hasta que se tomaba una decisión y llegaba la hora de volar hasta el emplazamiento elegido.

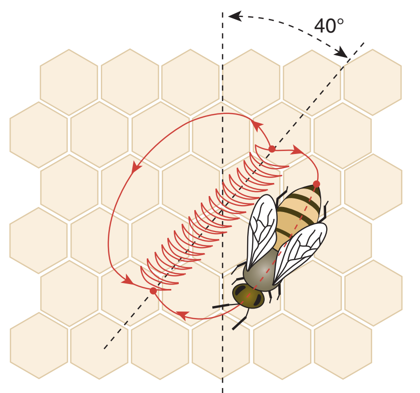
Descubrió también que, al principio, las danzas de las abejas señalaban distintos lugares en torno al enjambre; al ir pasando las horas, el número de asentamientos publicitados se iba reduciendo, hasta que por fin quedaba sólo uno, que era vigorosamente anunciado por docenas de abejas danzantes. Al poco de que las danzas se refirieran a un solo sitio, el enjambre completo despegaba súbitamente y volaba hacia el lugar acordado. A veces, el investigador lograba correr campo a través bajo el enjambre durante todo su vuelo y conocer así su destino exacto, que solía ser la oquedad de un árbol o de un edificio, siempre en el lugar indicado en las últimas danzas. No cabía duda: las abejas danzarinas informaban de lugares de anidamiento. De hecho, parecía como si éstas celebraran una especie de plebiscito sobre el futuro hogar del enjambre, aunque se desconocía la forma en que llevaban a cabo sus deliberaciones.

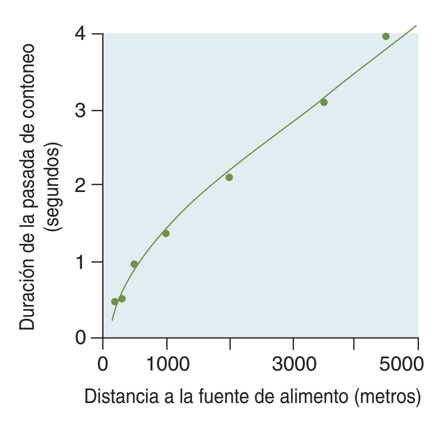
Un segundo análisis

A mediados de los años noventa, nos propusimos ahondar en esta apasionante muestra de democracia animal. En el intervalo transcurrido desde el trabajo de Lindauer, varios expertos habían estudiado las preferencias "inmobiliarias" de las abejas melíferas. Descubrieron que, para una colonia de abejas, una morada de primera clase debe disponer de una cavidad con una capacidad de más de 20 litros y un orificio de acceso de menos de 30 centímetros cuadrados, situado a varios metros de altura sobre el suelo, que mire al sur y se encuentre a ras del suelo de la cavidad. Pero nadie había determinado la forma en que las abejas exploradoras de un enjambre materializan estas "preferencias inmobiliarias" durante la elección colectiva de nueva residencia.

Lo primero que hicimos fue repetir las observaciones de Lindauer sobre las danzas de las exploradoras. Esta vez, sin embargo, usaríamos modernos equipos de vídeo para lograr una imagen más completa de la posible hace 50 años. Trabajamos con enjambres pequeños, de unos 4000 individuos. Marcamos las abejas una por una, para facilitar su identificación; así podríamos atribuir cada danza a un sujeto y, por tanto, cerciorarnos de su contribución a que el enjambre tomase una decisión determinada.







3. LAS ABEJAS MELIFERAS SE VALEN DE LA "DANZA DEL VIENTRE" para informar a las demás sobre fuentes de aprovisionamiento. Ahora bien, esa misma danza sirve también para describir la ubicación de los asentamientos donde anidar. En este ejemplo, hay flores situadas a lo largo de una línea que forma 40º hacia la derecha del Sol cuando las abejas salen de la colmena (*izquierda*). Para indicar el lugar, una abeja vuela trazando un ocho sobre un panal vertical (*centro*). En el tramo central de su danza, ejecuta una "pasada de contoneo": hace vibrar su cuerpo hacia los lados. El ángulo de esta pasada indica la dirección de la fuente de alimento; la duración revela la distancia hasta las flores (*derecha*). Cuando la danza se refiere a sedes de anidamiento, se desarrolla sobre la superficie del enjambre, en vez de hacerlo sobre los panales del interior de la colmena.

Grabamos las danzas ejecutadas por cada una de las abejas exploradoras. El patrón que descubrimos guardaba una estrecha semejanza con las conclusiones de Lindauer, basadas en las observaciones de sólo la primera danza de cada exploradora. En un enjambre que estuvimos observando desde el 20 al 22 de julio de 1997, el proceso completo de toma de decisión requirió unas 16 horas de actividad danzante, repartidas a lo largo de tres días. Durante la primera mitad del proceso, las exploradoras informaron de un total de once asentamientos candidatos, sin que ninguno de ellos predominase en las danzas. Durante la segunda mitad, en cambio, uno de los asentamientos fue ganando protagonismo hasta convertirse en el elegido. En el transcurso de las últimas horas del proceso de toma de decisión, el sitio que se erigió favorito pasó a ser el motivo de todas las danzas.

¿Consenso o quórum?

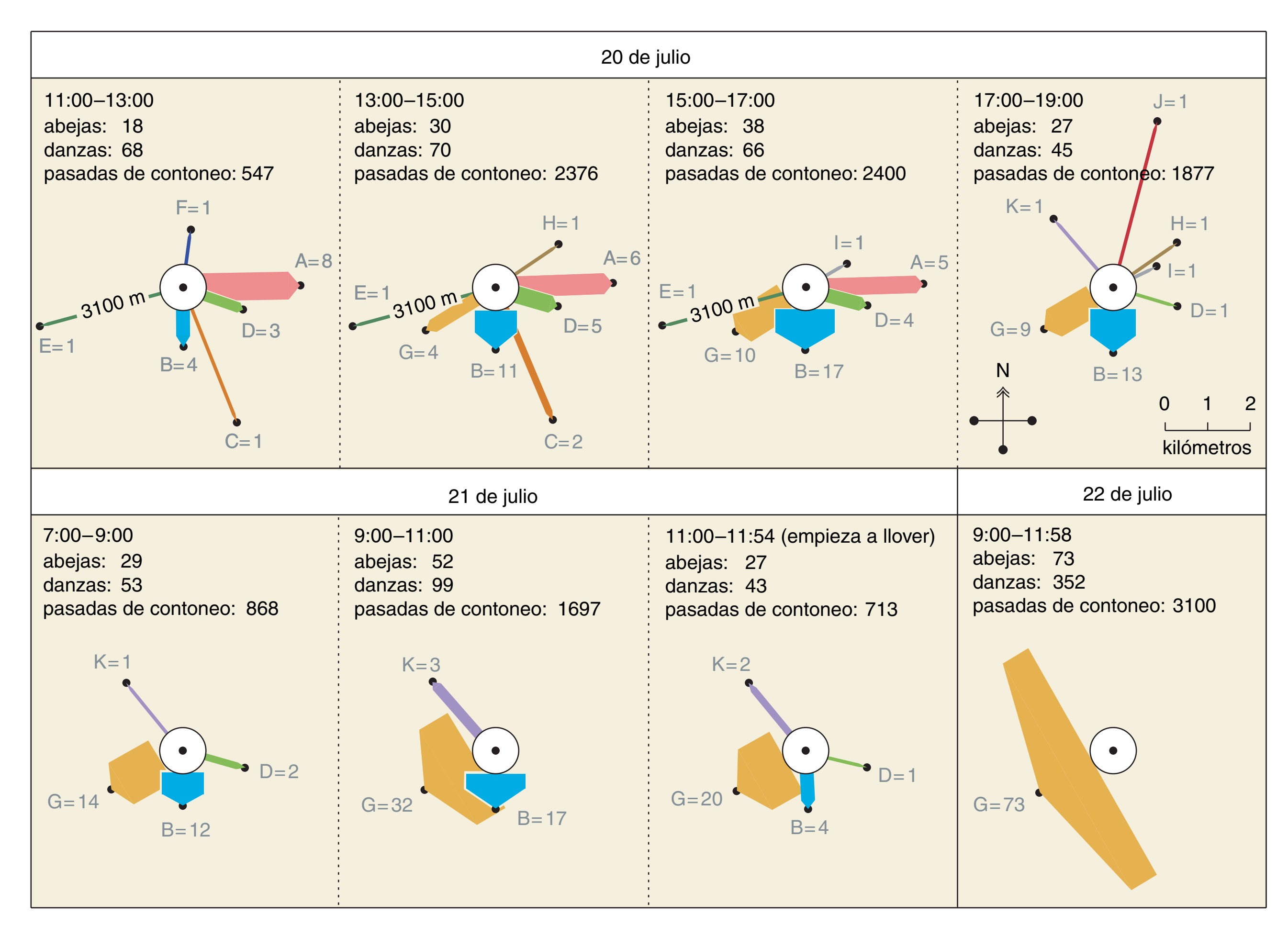
Ante la forma tan llamativa en que las danzarinas de un enjambre llegaban a representar un solo sitio y por el modo en que el enjambre acababa trasladándose a éste, diríase que la toma de decisiones en el enjambre correspondía, en esencia, a un proceso de obtención de consenso, algo así como el advenimiento del "sentir de la asamblea". Según esta hipótesis, cada abeja exploradora "vota" a favor de cierto asentamiento danzando por él; luego, las exploradoras interactúan para llegar a acuerdos a favor de un sitio cada vez mejor. El patrón de votos se supervisa con regularidad, con lo que saben cuándo han llegado a un acuerdo y pueden empezar a actuar en virtud del mismo.

Había, sin embargo, dos aspectos que ensombrecían esta hipótesis tan atractiva. En primer lugar, ni Lindauer ni nosotros habíamos observado señal alguna de que las exploradoras sondeasen a sus compañeras danzantes, algo que sin duda tendrían que hacer para saber si se ha llegado a un acuerdo. Segundo, tanto Lindauer como nosotros habíamos observado que, en alguna ocasión, el enjambre se echaba a volar sin que las danzantes hubieran llegado



4. ABEJAS MARCADAS con una diminuta pieza de plástico, numerada, coloreada y fija al tórax; en algunos casos, portan también una mancha de pintura en el abdomen. Estas marcas distinguen a las exploradoras, lo que facilita la observación del comportamiento de un enjambre.

STEPHANIE FREESE (*arriba*); THOMAS D. SEELEY (*abajo*)/*American Scientist*



5. ASI SE ALCANZA EN UN ENJAMBRE UN QUORUM favorable a un cierto lugar de anidamiento. En cada recuadro se resume un intervalo de actividad de una a tres horas; se indican el número total de abejas, danzas y pasadas de contoneo correspondientes a ese intervalo. El enjambre está representado por el círculo blanco. Los puntos de anidamiento candidatos (*puntos negros*) se han rotulado con letras, que corresponden al orden en que las abejas informaron de ellos. Las flechas denotan la dirección y la distancia hasta el emplazamiento; su grosor es proporcional al número de abejas que danzan en su favor durante el intervalo de tiempo correspondiente, que aparece indicado junto a la designación del sitio. En este caso el enjambre consideró un total de 11 sitios durante un plazo de tres días, pero ninguno de ellos se informó con mayor energía que los demás durante la primera mitad del proceso de toma de decisión. Durante la segunda mitad, en cambio, el emplazamiento G fue ganando apoyo y acabó siendo el motivo de todas las danzas.

THOMAS D. SEELEY/*American Scientist*

al consenso, es decir, pese a existir dos fuertes coaliciones danzantes que anunciaban emplazamientos distintos. Estos casos raros de despegue con disenso, ¿correspondían a meras anomalías curiosas, que no merecían atención, o se trataba de valiosas pistas, a las que debíamos atender?

Optamos por prestarles atención, pues veníamos preguntándonos desde hacía tiempo si la esencia de la toma de decisiones en el enjambre no estribaría en la percepción de un *quórum* (acuerdo entre un número suficiente de exploradoras) al respecto de uno de los sitios, en vez de un *consenso* (acuerdo unánime entre las exploradoras danzantes).

Según la hipótesis de percepción del quórum, una abeja exploradora "vota" a favor de un sitio pasando tiempo en él. Las exploradoras interactúan de forma que su número se eleva con mayor prontitud en los emplazamientos más idóneos; las abejas de cada sitio supervisan cuántas se hallan allí para saber si han alcanzado el número umbral (quórum) y pueden iniciar la puesta en marcha del enjambre hacia ese sitio. Ello explica los despegues con disenso: corresponderían a casos en los que se ha alcanzado el quórum en un sitio antes de que la competición entre las danzarinas que propugnan lugares distintos haya cesado las danzas correspondientes a todos los lugares menos a uno.

Ensayamos estas dos hipótesis (consenso y quórum) mediante experimentos realizados en la isla Appledore, sede del Laboratorio Marino de Shoals de la Universidad Cornell. La isla se encuentra frente a la costa de Maine. Apenas tiene árboles, por lo que carece de cavidades naturales de anidamiento para abejas melíferas. Cada uno de los enjambres que transportamos a la isla hubo, pues, de prestar atención a las colmenas artificiales que les proporcionamos.

En el primer experimento, presentamos a varios enjambres (uno cada vez) dos cajas de anidamiento idénticas, situadas cada una en un emplazamiento excelente. El enjambre se emplazaba en el centro de la isla; las dos cajas, cerca de la costa rocosa, cada una a unos 250 metros del enjambre, pero en direcciones

distintas. Descubrimos que cuando el enjambre se veía obligado a elegir entre dos emplazamientos de primera clase, emprendían sistemáticamente el vuelo cuando las exploradoras estaban todavía danzando vigorosamente a favor de ambos sitios. Parecía que el consenso no era necesario para que estos enjambres se lanzasen a volar hacia uno de los sitios. La hipótesis de la percepción de consenso quedaba, por tanto, desechada.

Al propio tiempo, se vio reforzada la hipótesis de la percepción de quórum: el enjambre, de forma sistemática, empezaba a prepararse para el vuelo en cuanto un grupo de 15 o más abejas se concentraba en una de las cajas de anidamiento. Es preciso señalar, no obstante, que, debido a que las abejas pasan la mayor parte del tiempo en el enjambre, si se observan al menos 15 de ellas en un sitio de anidamiento en un instante dado, ello significa que un total de unas 150 abejas están visitando ese emplazamiento.

En el segundo experimento, ensayamos la hipótesis de percepción de quórum mediante la verificación de una predicción falsable, consecuencia de ella: si se retrasa la formación de quórum en el sitio de anidamiento elegido, a la vez que se deja intacto el resto del proceso de toma de decisión, el vuelo del enjambre hasta ese lugar sufrirá también un retraso. Para demorar la formación de quórum situamos cinco cajas de anidamiento idénticas, muy cerca unas de otras, en un punto de la isla. Las exploradoras que visitaban el lugar se dispersaban, por tanto, entre cinco cavidades de anidamiento, en vez de concentrarse en una sola. Comprobamos entonces cuánto tardaba un enjambre, una vez descubierto el emplazamiento de las cajas-nido, en tomar la decisión de despegar hacia el sitio. Con cada enjambre, realizamos también una prueba de control con una sola caja.

Los dos ensayos correspondientes a cada enjambre se efectuaron en distintos puntos de la isla, con lo que cada ensayo comenzaba de la misma forma: con una abeja exploradora que descubría una cavidad de anidamiento atractiva en un lugar nuevo.

En los cuatro enjambres estudiados se producía un retraso notable en el despegue cuando se ofrecían cinco cajas (442 minutos de media), en comparación con el tiempo de decisión asociado a una sola caja (196 minutos de media). Los resultados respaldaban con fuerza la hipótesis de la percepción de quórum.

La forma en que las abejas exploradoras perciben el quórum sigue siendo un enigma. Quizá se valen de información visual, olfativa e incluso táctil para evaluar el número de compañeras exploradoras que hay en un sitio, pero ello sigue siendo materia para estudios futuros.

En cuanto el umbral de quórum se alcanza en uno de los sitios, las abejas dan inicio a un comportamiento que se conoce bien. Las exploradoras de este sitio regresan a la concentración del enjambre y empiezan a producir una señal acústica especial, aguda, que estimula a las no-exploradoras del enjambre a calentar sus músculos de vuelo, mediante tembleque, hasta los 33 a 35 grados centígrados que necesitan para volar. En la producción de esta señal de *gaiteo de obreras* ("worker piping"), una exploradora zigzaguea a través del enjambre apiñado; se detiene cada segundo o dos para hacer presión con su tórax contra otra abeja y activar así los músculos alares de ésta. Aunque casi toda la energía vibratoria se transfiere directamente a la abeja contactada, el movimiento produce una vibración audible que recuerda a los acelerones de calentamiento del motor de un fórmula uno. La señal de arranque dura unos 0,8 segundos; tiene una frecuencia fundamental de unos 200 hertz. Dado que el estímulo para el arranque consiste en un quórum —no en un consenso— de exploradoras en el emplazamiento elegido, el proceso de calentamiento del enjambre suele comenzar antes de que las exploradoras hayan alcanzado un consenso. Sin embargo, dado que el calentamiento dura una hora o más, sí suele haber tiempo suficiente para llegar al consenso antes de que todo el enjambre remonte el vuelo.



6. EN LA ISLA DE APPLEDORE, en Maine, escasean los árboles. Con ello nos aseguramos que las abejas se centren en las cajas de anidamiento que les proporcionamos. Los abrigos garantizan que todas las cajas queden expuestas por igual al sol, al viento y a la lluvia. El tamaño de la caja y el de su abertura se modificaron, para que la caja resultase más o menos atractiva para las abejas. Los observadores (*aquí, Seeley*) contaban el número de exploradoras que visitaban cada una de las cajas-nido.

THOMAS D. SEELEY/*American Scientist*

Elección del hogar más idóneo

A partir del estudio del proceso de toma de decisiones en los enjambres, mediante la observación de las danzas de las abejas exploradoras, Lindauer y nuestro grupo hemos demostrado que un enjambre elige nido de entre un conjunto de cinco o más emplazamientos posibles. Se plantea entonces la cuestión siguiente: ¿elige el enjambre el mejor de esos sitios? Y, de ser así, ¿cómo lo hace?

Para evaluar la precisión de la elección de emplazamiento, planteamos a los enjambres de Appledore la posibilidad de elegir entre cinco pun-

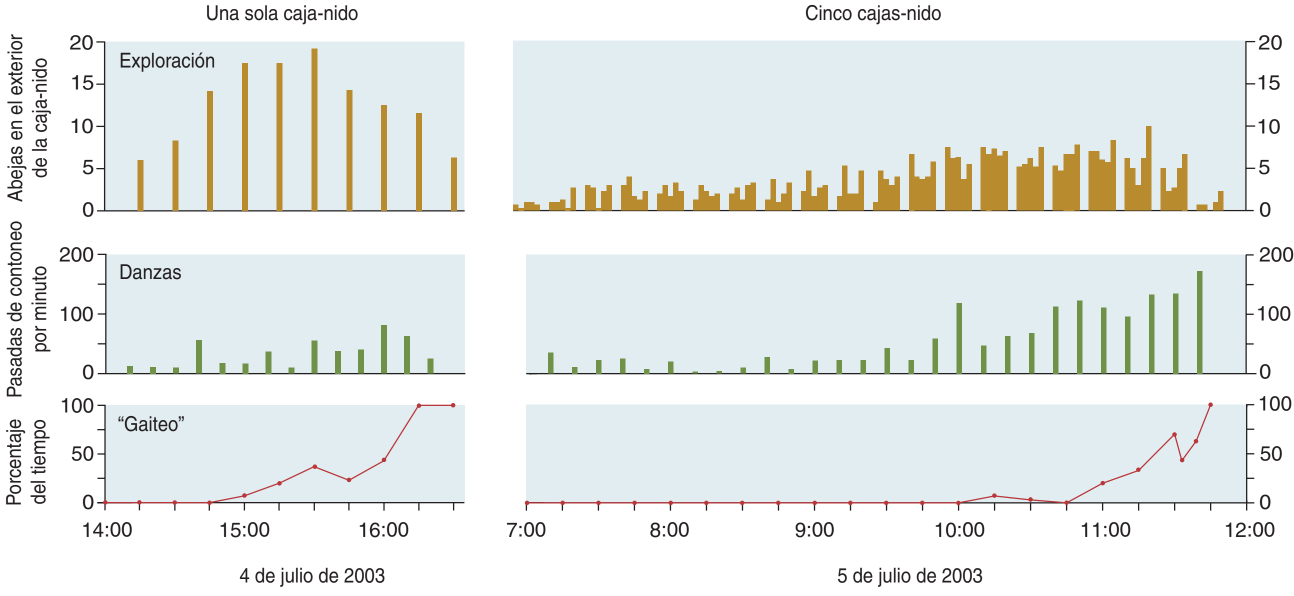
tos: cuatro anidamientos mediocres y uno excelente. Los anidamientos mediocres resultaban atractivos por todos los conceptos, excepto porque cada caja ofrecía sólo 15 litros de espacio habitable. La caja-nido excelente era idéntica a las otras, pero proporcionaba, en cambio, un espacio de 40 litros, el más adecuado para satisfacer las diversas necesidades de espacio de una colonia (cuidado de las crías, almacenaje de alimento, etcétera).

Casi todos los enjambres del experimento eligieron la mejor caja-nido. Si bien la sede excelente no era nunca la primera en ser descubierta, una vez una abeja exploradora daba con ella, el número de abejas que la visitaban crecía con mayor prontitud que en otros sitios y alcanzaba antes el umbral de quórum. Además, al tiempo que aumentaba el número de abejas en el lugar óptimo, disminuía el de los lugares mediocres; es decir, el interés creciente por el punto de máxima calidad reducía el interés por los demás. Esta inhibición del crecimiento en los sitios menos atractivos por acumulación en el mejor reviste suma importancia, pues contribuye a que el umbral de quórum se supere antes en el sitio óptimo y a la generación del patrón de consenso entre danzarinas, que aparece casi siempre un poco antes de que el enjambre emprenda el vuelo hacia su nuevo hogar.

¿Cuáles son los mecanismos conductuales individuales que subyacen a estas dinámicas? Uno de ellos es una fina regulación de la intensidad de la danza ventral, que se expresa mediante el número de circuitos que se ejecutan para un sitio y varía en función de la calidad del mismo. Para estudiar este fenómeno, ofrecimos a un enjambre de la isla Appledore dos cajas-nido a la vez, una excelente y otra mediocre; analizamos las danzas correspondientes a las dos cajas cuando se interpretaban codo a codo sobre el enjambre.

Descubrimos que la primera vez que una exploradora regresaba al enjambre, de vuelta de un emplazamiento de primera clase, realizaba 100 o más circuitos de danza del vientre. Las exploradoras también informaban de emplazamientos nidales mediocres, pero aceptables, por si acaso no se hallaba nada mejor. En cambio, la primera vez que una exploradora regresaba de un emplazamiento mediocre, realizaba una danza compuesta sólo por una docena de circuitos. Cuanto mayor era la intensidad de la danza correspondiente a un lugar determinado, tanto mayor era el flujo de abejas nuevas que iban a visitarlo. En breve, el incremento de exploradoras será más rápido en el sitio que ofrece mejores condiciones.

La diferencia en intensidad de las señales de reclutamiento está amplificada por otra curiosa característica del comportamiento de las abejas exploradoras. Si una exploradora se mantiene fiel a un sitio, realizará múltiples visitas al mismo (para expresar preferencia por "su sitio" y para mantenerse informada de cómo va aumentando allí el número de compañeras exploradoras); tras cada visita, la abeja indicará el lugar con una danza del vientre. Sin embargo, reducirá la intensidad de su danza informativa en unos 15 circuitos cada vez que regrese



7. ENSAYO DE LA HIPOTESIS de la percepción de quórum. Esta teoría describe el modo en que las abejas exploradoras saben en qué momento ha tomado el enjambre una decisión sobre su nuevo nido. Los resultados muestran lo que ocurre al diluir la atención de las abejas mediante el emplazamiento de cinco cajas-nido idénticas en un mismo lugar. Cuando se les ofreció una sola caja, el número de exploradoras que visitaban el lugar (*arriba a la izquierda*) y la tasa de danzas sobre el enjambre (*en el centro a la izquierda*) aumentaba con prontitud; el "gaiteo" de arranque, que alerta al enjambre para que se apreste a despegar, ganó intensidad al cabo de sólo 79 minutos de danza (*abajo a la izquierda*). En el escenario con cinco cajas, el número de abejas exploradoras no pasó de diez en ninguno de los sitios, pues las abejas se repartieron entre las cajas idénticas (*arriba a la derecha*); las danzas duraron más tiempo (*en el centro a la derecha*); el "gaiteo" no se intensificó hasta pasados 244 minutos de danzas (*abajo a la derecha*). La duración de las danzas antes del despegue fue de 138 minutos y 277 minutos para los casos de una y de cinco cajas, respectivamente.

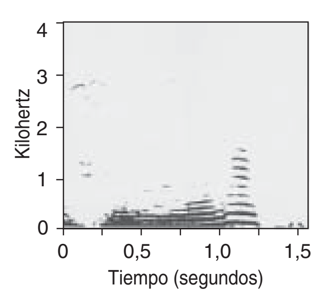
STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

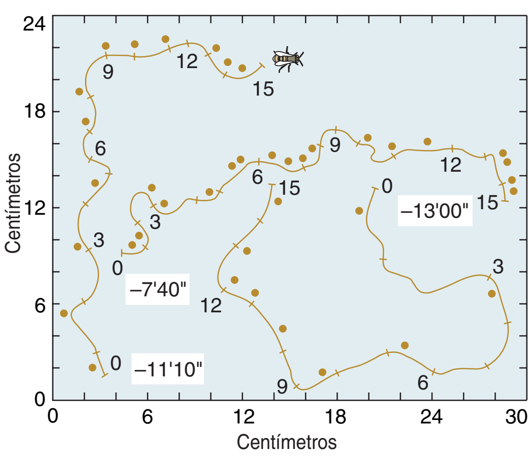
al enjambre para realizar el baile. Así pues, la diferencia total entre la intensidad de dos señales de reclutamiento, correspondientes a dos sitios distintos, constituye casi una función exponencial de la diferencia de calidad entre tales sitios.

Si dos abejas que anuncian un asentamiento excelente y uno mediocre ejecutan, respectivamente, 90 y 30 circuitos de danza en su primer regreso al enjambre, la diferencia total en sus señales de reclutamiento no será el triple, sino el séptuplo (90 + 75 + 60 + 45 + 30 + 15 + 0 = 315 circuitos en total, frente a 30 + 15 + 0 = 45 circuitos en total). A esto se añade una fuerte retroalimentación positiva en el proceso de reclutamiento, pues cuanto mayor sea el número de abejas partidarias de un sitio, mayor será el número de reclutadoras, lo que genera, a su vez, un número todavía mayor de abejas partidarias del sitio. Por tanto, pequeñas diferencias en la calidad de los sitios de anidamiento y en la intensidad de las danzas correspondientes aumentan en progresión geométrica y generan grandes diferencias en el número de exploradoras afiliadas a dichos sitios.

Las diferencias en el vigor de la danza ventral y la retroalimentación positiva inherente a este proceso de reclutamiento explican la diversidad del número de exploradoras consagradas a los lugares candidatos, siendo el más adecuado el que gana adeptas con mayor prontitud. Pero, ¿qué provoca la caída del número de partidarias de los sitios de menor calidad, al tiempo que se infla el correspondiente al mejor? La caída responde al hecho de que todas las exploradoras, incluso las asociadas a sitios excelentes, acaban por abandonar su sitio. De ordinario, una abeja deja de visitar un lugar poco después de haber dejado de danzar a favor del mismo; las abejas abandonan los sitios malos antes que los buenos.

Una vez que una exploradora abandona un sitio, se “repone a cero”. Se la recluta para otro sitio o incluso para el mismo sitio por segunda vez. No obstante, cuando una abeja abandona la danza a favor de un lugar, en el 80 por ciento de las veces dejará de danzar definitivamente. Las exploradoras dependen, en consecuencia, del reclutamiento de otras exploradoras que no han encontrado emplazamientos candidatos durante su búsqueda y que, por ello, no se han comprometido con ningún lugar.







8. LAS EXPLORADORAS “GAITERAS” describen un trazado aleatorio sobre el enjambre que estimula a las obreras y las apresta para el despegue (*arriba a la derecha*). Aquí se representan trayectorias de 15 segundos; los puntos indican acontecimientos de “gaiteo”. En los recuadros blancos se consigna el tiempo hasta el despegue del enjambre. Cuando una abeja “gaitea”, junta las alas, hace presión con el tórax contra el sustrato y activa los músculos de las alas para producir una vibración (*abajo a la derecha*). En la colmena, las exploradoras hacen esto sobre un panal, pero en el enjambre, casi siempre lo hacen directamente sobre otra abeja. Un sonograma muestra que la señal es cada vez más aguda (aumenta la frecuencia) y contiene armónicos (*arriba a la izquierda*).

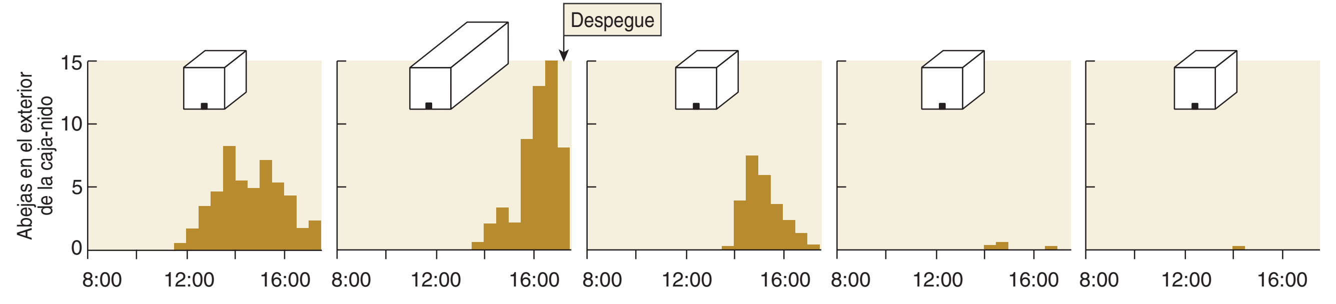
THOMAS D. SEELEY (*gráficas*); STEPHANIE FREESE (*abeja*)/*American Scientist*

Ahora bien, cuando una abeja es reclutada para visitar un sitio, si no le parece lo bastante bueno quizá no se incline de inmediato por él y, por tanto, no se ponga a danzar en su favor a su regreso. Cabe, pues, que una exploradora no comprometida visite varios sitios antes de encontrar uno que en su opinión valga la pena.

En cuanto la tasa de reclutamiento a favor de un sitio supere a la de abandonos, aumentará el número de exploradoras afiliadas a ese sitio. Al final, la tasa de reclutamiento para el emplazamiento de máxima calidad crecerá tanto, que se desplomarán las tasas correspondientes a lugares de menor calidad; el grupo de exploradoras no comprometidas es finito y la mayoría son reclutadas para el lugar óptimo. Cuando la tasa de reclutamiento cae por debajo de la tasa de abandono en cada uno de los lugares de menor calidad, el número de exploradoras partidarias de ellos empieza a disminuir. En breve, conforme crece el grupo partidario del lugar óptimo, van quedando excluidos de la competición los grupos afiliados a emplazamientos menos adecuados.

Mary R. Myerscough, de la Universidad de Sydney, ha desarrollado modelos matemáticos de la dinámica poblacional de las abejas exploradoras cuando éstas efectúan danzas para las distintas sedes de anidamiento. Ha demostrado que, si se les concede tiempo, las exploradoras danzantes acabarán, casi siempre, centrando la atención en el mejor de los sitios descubiertos. Este resultado concuerda con lo que Lindauer y nosotros hemos presenciado en las interrelaciones entre exploradoras: se alcanza por lo común un consenso o acuerdo antes de que el enjambre emprenda el vuelo hacia el nuevo hogar.

Aunque la unanimidad entre abejas danzantes poco antes del despegue constituye un rasgo sobresaliente de los registros de danzas, la esencia de la toma de decisiones grupales en los enjambres consiste en alcan-



9. ¿ELIGEN SIEMPRE LAS ABEJAS EL MEJOR DE LOS SITIOS DISPONIBLES? Para averiguarlo, situamos en abanico y a la misma distancia del enjambre (250 metros) cinco cajas: cuatro mediocres, de sólo 15 litros de capacidad, y una magnífica, de 40 litros. Cada 30 minutos se contaban las exploradoras que visitaban cada sitio. El sitio mejor no fue el primero en ser descubierto; sin embargo, una vez localizado, el interés por él creció rápidamente y por fin atrajo hacia sí toda la atención, por lo que el quórum se alcanzó allí en primer lugar. Las abejas seleccionaron la sede óptima en cuatro de las cinco pruebas.

zar un quórum, no un consenso. Sin embargo, no se debiera considerar que el consenso corresponde a un subproducto incidental y de importancia menor en la toma de decisiones. Por el contrario: tal consenso es necesario para que el enjambre tenga éxito en su vuelo hacia la nueva residencia.

Hemos observado, en ocasiones, que un enjambre remontaba el vuelo, mientras las exploradoras danzaban vigorosamente en favor de diversos sitios. En todos los casos, el enjambre, ya en el aire, parecía incapacitado para alejarse. No acaban de conocerse los mecanismos de guiado del enjambre en vuelo, pero de tales observaciones se deduce que el proceso de guiado depende de que un número suficiente de exploradoras proporcionen una información direccional coherente para el resto de las abejas del enjambre en vuelo. Diríase que, cuando se produce una división de opiniones, el enjambre necesita posarse de nuevo y continuar con las deliberaciones, hasta que uno de los lugares candidatos predomine.

Prontitud y acierto

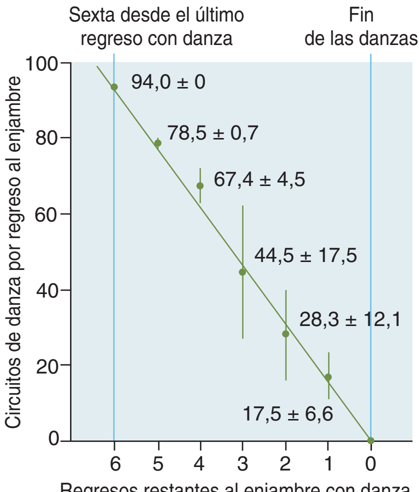
Un problema fundamental en la toma de decisiones estriba en hallar un punto medio idóneo entre la prontitud y el acierto de la decisión. Cuando un animal, o un grupo, ha de decidir rápidamente, corre el riesgo de que su decisión sea errónea o mediocre; no puede examinar un número elevado de posibilidades, no puede evaluarlas con suficiente profundidad o ni uno cosa ni otra.

Si damos por supuesto que a un enjambre se le plantea el mismo dilema entre prontitud y precisión al escoger un nido, cabe preguntarse si la selección natural habría afinado los parámetros conductuales del proceso de decisión grupal en las abejas, de modo que el enjambre haya de soportar costos reducidos de tiempo y energía, al propio tiempo que minimiza las probabilidades de elegir un sitio poco idóneo.

Con el fin de averiguarlo, pergeñamos un modelo matemático estocástico, con variable temporal discreta, del proceso de toma de decisiones de los enjambres. Luego utilizamos este modelo para crear enjambres "pseudo-mutantes", es decir, enjambres con distintos valores para los diversos parámetros conductuales. Observamos así de qué modo los incrementos o decrementos de cada parámetro afectaban a la prontitud y la precisión con que el enjambre elegía su hogar.

Un parámetro obviamente susceptible de modificación era el tamaño del quórum, pues la percepción del quórum resulta fundamental en la toma de decisiones del enjambre. Al variar el tamaño del quórum en el modelo (manteniendo todo lo demás en sus valores normales), observamos que un quórum reducido conllevaba decisiones rápidas, aunque a menudo inadecuadas; con un quórum elevado, en cambio, pese a que la decisión se retrasare, era más acertada. Cabe resaltar que el valor de quórum deducido del modelo que proporcionaba un equilibrio idóneo entre prontitud y precisión —entre 15 y 20 abejas— concuerda con la observación empírica: las abejas exploradoras dan comienzo al proceso de calentamiento del enjambre, previo al despegue, cuando el número de abejas que rondan uno de los sitios se sitúa entre 10 y 20.

Examinamos también una de las características del comportamiento de las abejas exploradoras que parece contribuir al proceso de toma de decisiones del enjambre: a saber, la forma en que una exploradora reduce la intensidad de su danza a favor de una posible sede de anidamien-



10. EL NUMERO DE CIRCUITOS de danzas ventrales que una exploradora ejecuta tras la visita a un sitio disminuye de forma rápida y lineal en cada uno de los sucesivos regresos al enjambre. Sin embargo, las abejas partidarias de sitios excelentes empiezan con un número grande de circuitos de danza, mientras que las abejas que visitaron sitios mediocres comienzan en puntos más bajos de la línea. Así pues, las exploradoras gradúan la intensidad de su reclutamiento en función de la calidad del sitio.

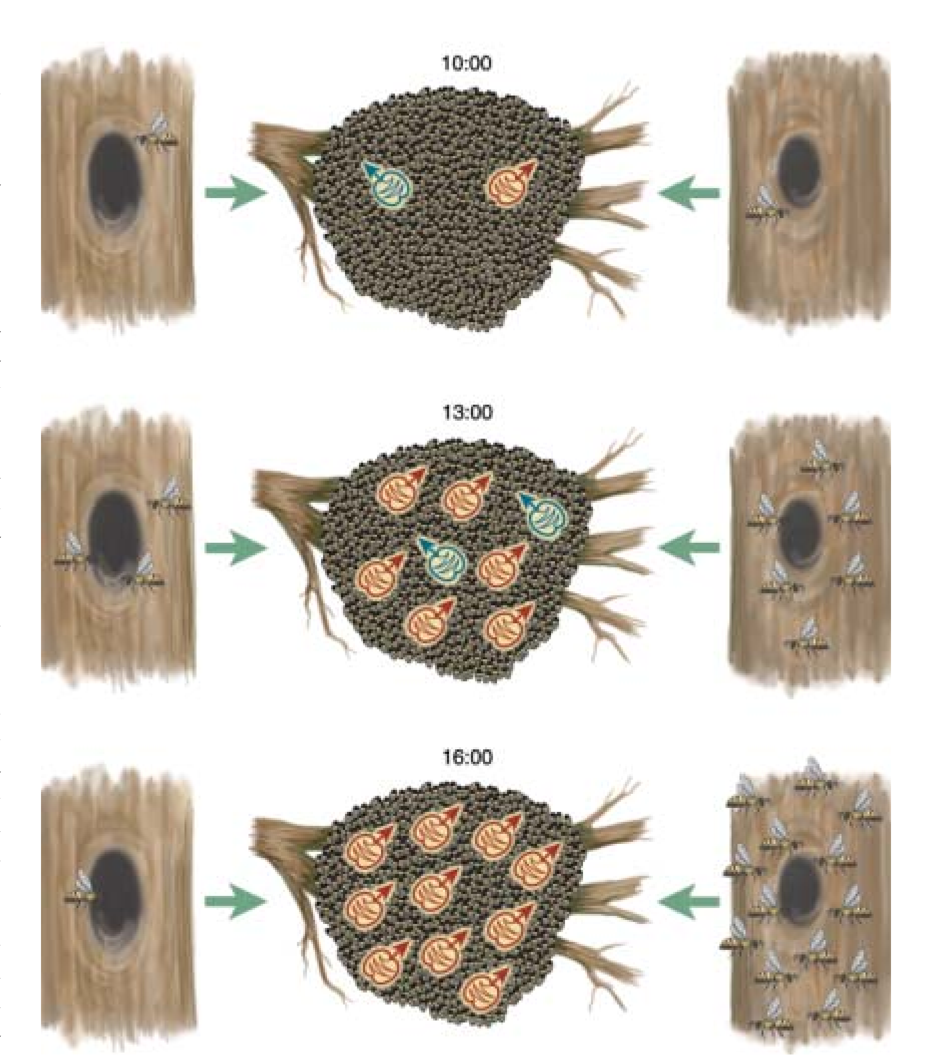


to, cuando efectúa repetidas visitas a la misma. Resulta llamativo que cada vez que una exploradora visita un posible lugar de anidamiento y regresa luego al enjambre para informar del sitio, ejecuta un número menor de circuitos de danza; es decir, aboga a favor de su sitio cada vez con menos vehemencia. Al variar en nuestro modelo la tasa de reducción de circuitos por danza quedó manifiesta la importancia de ese factor.

En efecto, si el número de circuitos se reduce con mayor prontitud que la observada en la naturaleza, el tiempo necesario para llegar a una decisión aumenta, pues un descenso rápido en el número de circuitos dificulta el alcance de quórum en cualquiera de los sitios. Recíprocamente, si el número de circuitos se reduce a un ritmo menor que el observado en la naturaleza, surge un problema todavía más grave: la toma de decisiones en el enjambre fracasa al producirse decisiones con disenso (se alcanza el quórum en lugares distintos).

En consecuencia, según nuestro modelo, la tasa de reducción de circuitos que proporciona un buen equilibrio entre prontitud y precisión (entre 15 y 20 circuitos de danza por visita al nido) coincide con la observación empírica: por término medio, las abejas abrevian sus danzas en unos 15 circuitos por visita a un asentamiento.

A la vista de estos hallazgos sobre el tamaño del quórum, la reducción del número de circuitos por danza y otros parámetros, dedujimos que la selección natural ha depurado y refinado la conducta de las exploradoras en los enjambres de abejas melíferas. Se ha desarrollado un proceso de decisión grupal que ofrece un equilibrio cuasióptimo entre las exigencias contradictorias de prontitud y acierto.



11. LAS ABEJAS EXPLORADORAS gradúan la intensidad de su danza en función de la calidad del alojamiento descubierto. Ello acelera el logro de un quórum en el mejor de los lugares disponibles. En este caso, las exploradoras localizan dos sitios potenciales, uno con una gran entrada (*izquierda*) y otra con una entrada menor, más deseable (*derecha*). Cada exploradora vuelve entonces al enjambre (*flechas verdes*) y ejecuta una danza ventral correspondiente a su sitio (*arriba, centro*); pero la exploradora que ha encontrado el mejor de los dos ejecuta un número de circuitos de danza mayor (*rojo*) que la procedente del árbol izquierdo (*azul*). Tres horas más tarde, el número de exploradoras comprometidas con el árbol derecho se ha multiplicado por seis, mientras que el apoyo para el árbol izquierdo sólo se ha triplicado; la mayoría de las danzas son favorables al árbol derecho (*centro*). Transcurridas tres horas más, el número de exploradoras del árbol de la derecha se ha engrosado y las danzas en favor de este sitio han excluido de la competición al árbol de la izquierda (*abajo*).

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

Enjambre sabio

Henry David Thoreau lamentaba en una de las anotaciones de su diario de 1838 la dificultad con que topan los grupos humanos para lograr una inteligencia colectiva. "La masa nunca alcanza el nivel del mejor de sus miembros; por el contrario, se degrada a sí misma hasta el nivel del más rastrero." En esta misma línea, Friedrich Nietzsche escribía en *Más allá del bien y del mal*: "La locura es la excepción en los individuos, pero la norma en los grupos." Con todo, los grupos no toman siempre decisiones lamentables; en ocasiones, deciden con acierto. ¿En qué circunstancias los grupos piensan con inteligencia elevada y actúan de forma colectiva para tomar decisiones acertadas? En nuestra opinión, el proceder de un enjambre en la selección de un nido arroja luz sobre esta cuestión. Resulta evidente que las abejas realizan con éxito juicios colectivos.

El primer aspecto relevante es que la organización de las abejas exploradoras promueve la diversidad de conocimiento en el seno del grupo. No están dirigidas ni dominadas por un grupo restringido de abejas. Antes bien, en el proceso que conduce a la toma de decisiones participan todas las exploradoras del enjambre. Ello

significa que la toma de decisiones se basa en las acciones de centenares de individuos: cada uno opera como un agente autónomo que proporciona información propia e independiente para resolver el problema de búsqueda de vivienda.

El primer estadio de la toma de decisiones se basa en el descubrimiento de las diversas posibilidades entre las que optar: los centenares de abejas exploradoras del enjambre, que buscan todas a la vez y exploran una zona amplia, aportan a su regreso información variada —de lugares excelentes, mediocres o lamentables—, que comparten con otras exploradoras mediante la ejecución de danzas ventrales. Informan con plena libertad de todos los sitios de anidamiento posibles; ninguna lo hace en sordina.

Así pues, el enjambre extrae pleno provecho de su naturaleza colectiva para ensamblar con prontitud —a menudo en sólo unas cuantas horas— una profusión de opciones. Cuantas más sean éstas, mayor es la probabilidad de que una de ellas corresponda a un asentamiento de primera categoría. La organización descentralizada constituye, pues, una de las propiedades esenciales de la toma de decisiones en un enjambre: asegura la disponibilidad de un amplio abanico de opciones.

Un segundo rasgo del comportamiento de las abejas promueve su inteligencia colectiva: las exploradoras no muestran tendencia hacia la conformidad, ni hacia la imitación servil de otras, mientras contribuyen a la toma de decisiones. Ya hemos explicado que el motor de este proceso es una competición entre las diversas coaliciones de exploradoras afiliadas a distintas sedes, cada una de las cuales se esfuerza en sumar a su grupo exploradoras sin adscripción. Los miembros de cada coalición reclutan nuevos miembros mediante la ejecución de danzas ventrales, cuya intensidad depende de la calidad del sitio examinado: cuanto mejor sea éste, más vigorosa será la danza y mayor el flujo de nuevas asociadas. Pero cuando se recluta una nueva exploradora para inspeccionar un sitio, ésta no respalda ciegamente a la guía. Prefiere examinar por sí misma el lugar indicado: sólo si ella juzga que se trata de un emplazamiento valioso ejecutará su propia danza a favor y, así, reclutará todavía más abejas para el sitio. A través de esta independencia de opinión, las exploradoras evitan la propagación de errores en la evaluación de emplazamientos. Sólo si el sitio es verdaderamente bueno, las danzantes atraerán a nuevas danzantes; se producirá un fuerte incremento en el número de exploradoras que rondan el sitio. Las abejas exploradoras evitan así las manías colectivas por opciones sin valor.

La tercera clave para el éxito del enjambre estriba en el modo en que el proceso de percepción de quórum agrega las opiniones diversas e independientes de las exploradoras, pues equilibra las necesidades opuestas de acierto y prontitud en la toma de decisión. El grado de quórum es suficientemente elevado como para que muchas abejas deban evaluar de forma independiente la calidad del sitio antes de que se erija favorito. La selección rápida, basada en la opinión favorable de sólo una o de unas cuantas abejas, no es posible. El proceso de percepción de quórum filtra y elimina las opiniones extremistas o desacertadas; proporciona una evaluación ponderada, a escala de grupo, del emplazamiento elegido. Tal evaluación requiere tiempo, pero garantiza un intervalo suficiente para que surjan auténticas diferencias de opinión y para que los sitios descubiertos se evalúen con criterios independientes. Así pues, la agregación de las informaciones de las abejas mediante la percepción de quórum favorece la diversidad y la independencia de opinión, pero sólo durante el tiempo suficiente para hacer improbable que se incurra en un error de decisión.

Las consideraciones anteriores ilustran la forma en que el estudio de la toma de decisiones en enjambres podría contribuir a que los grupos de humanos logren la inteligencia colectiva y eviten así la colectiva necedad. Las abejas nos hacen ver que el acierto en las decisiones grupales se favorece mediante la adquisición en el grupo de tres hábitos cruciales: estructuración de las deliberaciones en forma de competición abierta de ideas, promoción de la diversidad de conocimientos y la independencia de opiniones entre miembros de un grupo y, por fin, agregación de las opiniones mediante procedimientos que respeten las limitaciones de tiempo y, a la vez, aprovechen sabiamente el abanico de conocimientos que el grupo posee.

Los autores

Thomas D. Seeley, docente de neurobiología y comportamiento en la Universidad de Cornell, se formó en Harvard. Centra su investigación en la organización funcional de las colonias de abejas melíferas. **P. Kirk Visscher**, doctorado en entomología por la Universidad Cornell, es profesor de entomología en la Universidad de California en Riverside. Se ha especializado en el estudio del comportamiento social y la comunicación de las abejas. **Kevin M. Passimo** enseña ingeniería eléctrica e informática en la Universidad estatal de Ohio. Se doctoró en ingeniería eléctrica en la Universidad de Notre Dame en 1989. Su investigación se centra en la biología de sistemas y en el diseño de técnicas de inspiración biológica.

Bibliografía complementaria

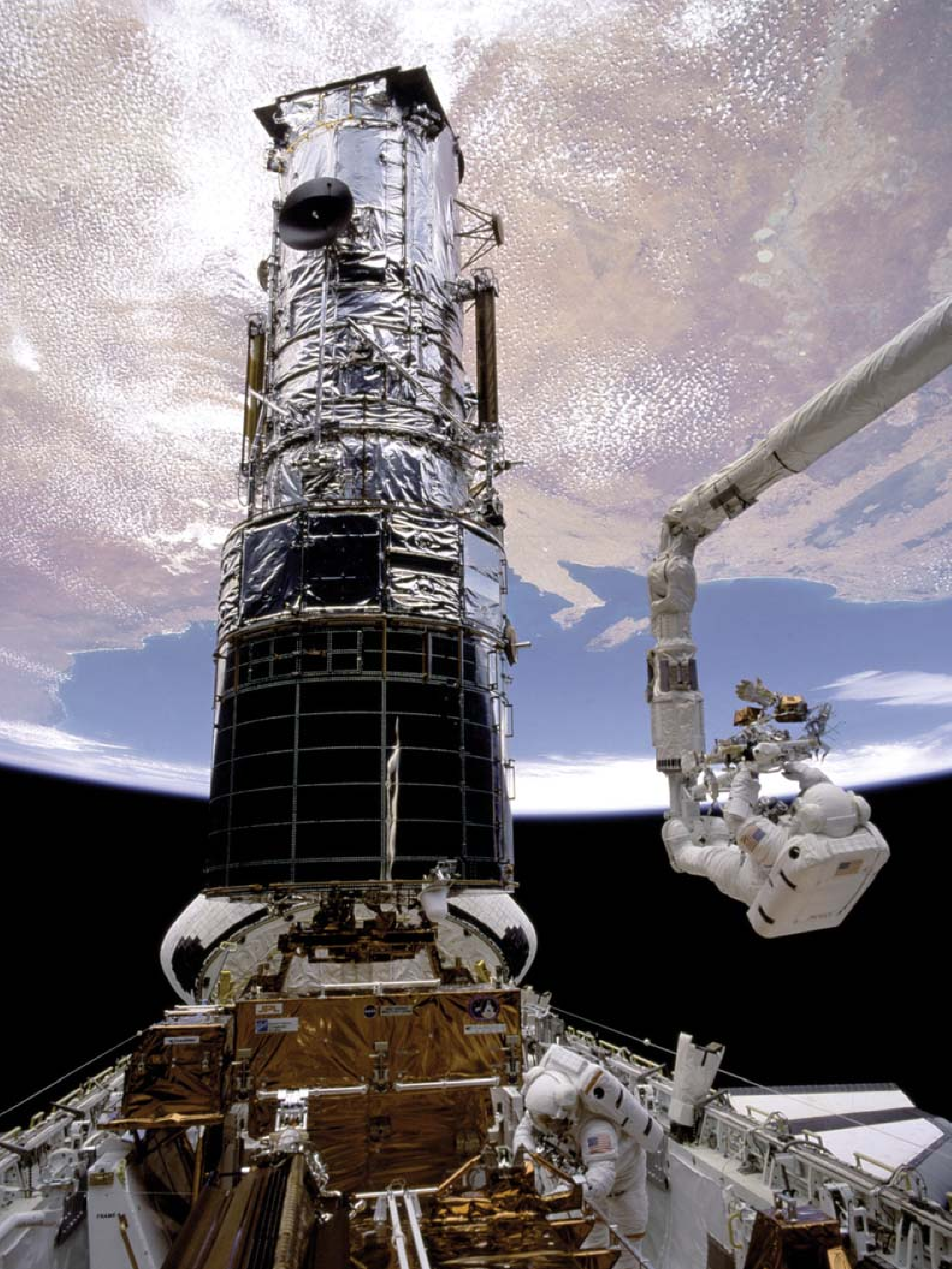
QUORUM SENSING DURING NEST-SITE SELECTION BY HONEY BEE SWARMS. T. D. Seeley y P. K. Visscher en *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 56; págs. 594-601; 2004.

THE WISDOM OF CROWDS. J. Surowiecki. Doubleday; Nueva York, 2004.

CONSENSUS DECISION MAKING IN ANIMALS. L. Conradt y T. J. Roper en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 20; págs. 449-456; 2005.

HOW DOES AN INFORMED MINORITY OF SCOUTS GUIDE A HONEY BEE SWARM AS IT FLIES TO ITS NEW HOME? M. Beekman, R. L. Fathke y T. D. Seeley en *Animal Behaviour*, vol. 71; págs. 161-171; 2006.

MODELLING AND ANALYSIS OF NEST-SITE SELECTION BY HONEY BEE SWARMS. THE SPEED AND ACCURACY TRADE-OFF. K. M. Passino y T. D. Seeley en *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 59; págs. 427-442; 2006.



1. EN LA PRIMERA REVISION del Telescopio Espacial Hubble en diciembre de 1993, los astronautas Story Musgrave (*en el brazo articulado*), Jeffrey Hoffman (*en la cubierta*) y sus compañeros arreglaron el problema que tenía el espejo desde su fabricación. A partir de entonces llovieron los descubrimientos.

Los 10 descubrimientos principales del Hubble

Mientras esperan la última restauración del Telescopio Espacial Hubble, los astrónomos reflexionan sobre los descubrimientos más destacados cosechados en los dieciséis años que lleva en órbita

Mario Livio

Muy pocos telescopios habrán contado tanto en la investigación astrofísica como el Telescopio Espacial Hubble, a lo largo de la historia. Sin embargo, no ha destacado por lo que muchos piensan. No ha realizado ningún descubrimiento que sea única y exclusivamente suyo. Pero ha convertido indicios y sospechas sugeridas por las observaciones terrestres en certezas casi absolutas. Ha trabajado en colaboración con otros observatorios para proporcionar una visión multicolor del cosmos. Ha obligado a los teóricos a ampliar sus teorías y a construir algunas nuevas. En definitiva, la inmensa influencia del Hubble no se debe a que se encuentre distante de los demás instrumentos, sino a su integración perfecta con ellos.

En abril de 2006 cumplió su decimosexto aniversario en el espacio. Ha proporcionado a los astrónomos imágenes con un grado de detalle sin precedentes y ha traído las maravillas del universo a los hogares de todo el mundo. Tales logros se han visto eclipsados, sin embargo, por el debate sobre su futuro. Mientras la NASA se esfuerza en reanudar los vuelos de los transbordadores espaciales, el Hubble continúa deteriorándose. A menos que los astronautas puedan llegar a él para mantenerlo en funcionamiento, alcanzará el final de sus días útiles a mediados de 2008. Esta encrucijada me ha movido a resumir los dieciséis años del Hubble y de la astronomía, que en ese período ha conocido una verdadera edad de oro.

Presento a continuación mi selección —reconozco que sesgada— de los diez hitos científicos más notables del Hubble. Abarcan la escala entera de tamaños, de los planetas a las galaxias, de las galaxias al universo en su totalidad. Resultó harto difícil hacer justicia en un artículo a todas las contribuciones del Hubble. En el momento de escribir este texto, el contenido del archivo del telescopio superaba los 27 terabytes de datos y continúa creciendo unos 390 gigabytes por mes. Con esos datos se han escrito 6300 artículos científicos. Y sigue produciendo resultados científicos asombrosos. En colaboración con otros observatorios, el Hubble descubrió el año pasado dos satélites más de Plutón, una galaxia de los primeros tiempos del universo (de enorme tamaño, difícil de explicar) y un compañero de masa planetaria alrededor de una enana marrón, que tampoco pesa más que un planeta. Debemos considerarnos muy afortunados por vivir en una era en la que hemos visto aspectos del universo que antes sólo podrían haberse explorado con la imaginación.

NASA

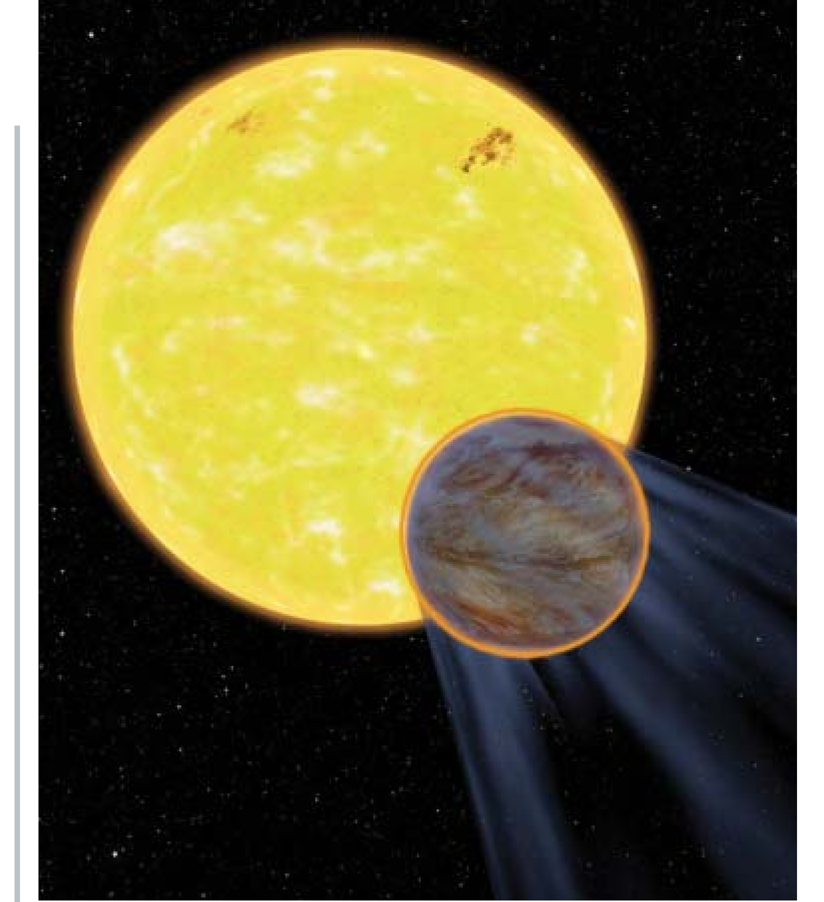
1 El choque del cometa gigante

Desde una perspectiva cósmica, el impacto del cometa Shoemaker-Levy 9 contra Júpiter no habría sido digno de mención: las superficies repletas de cráteres de los cuerpos planetarios rocosos y de los satélites nos recuerdan que el sistema solar sigue siendo un campo de tiro. Desde una perspectiva humana, sin embargo, la colisión fue un acontecimiento único. En promedio, un cometa choca contra un planeta sólo una vez cada mil años.

Un año antes del impacto, las imágenes del Hubble revelaron que el cometa se había disgregado en un rosario de dos docenas de fragmentos. Los primeros cayeron sobre la atmósfera de Júpiter el 16 de julio de 1994; a lo largo de la semana siguiente llegaron los demás. Las imágenes mostraban sobre el horizonte joviano penachos parecidos a los hongos nucleares, que descendían y se dispersaban antes de que hubiesen transcurrido diez minutos desde el impacto. En la superficie del planeta se percibieron las huellas durante meses.

La rareza de las imágenes las hace valiosas en sí mismas, pero los datos suscitaron además preguntas de difícil respuesta sobre la composición del planeta gigante gaseoso. En uno de los puntos de impacto, se propagaron hacia fuera ondas a 450 metros por segundo. La explicación más razonable es que se trata de ondas de gravedad; la fuerza restauradora sería entonces la de Arquímedes; la misma que opera cuando queremos hundir un trozo de madera en el agua y la pieza oscila arriba y abajo. Si realmente es así, las propiedades de las ondas sugieren que la razón entre el oxígeno y el hidrógeno en la nube de agua por la que se propagan las ondas decuplica la registrada en el Sol. Sin embargo, si el origen de Júpiter es la ruptura gravitatoria de un disco primordial de gas y polvo, tal y como suponen los teóricos, su composición debería ser la misma que la del disco y. por lo tanto, similar a la del Sol. Sigue sin conocerse la respuesta.

2. OCHO IMPACTOS en el hemisferio sur de Júpiter; la imagen corresponde al 22 de julio de 1994 (algunos impactos se superponen o apenas son visibles). Debajo, un penacho de humo semejante a un hongo atómico sobre el borde del planeta, a los seis minutos del impacto del 16 de julio.



3. DEL BRILLO DE UNA ESTRELLA puede el Hubble deducir el perfil de un planeta que gire a su alrededor en el momento en que pasa ante ella (representación artística).

2 Planetas extrasolares

En 2001 la Sociedad Astronómica Norteamericana pidió a los planetólogos que votaran por el mayor descubrimiento de la década anterior. Eligieron la detección de planetas fuera de nuestro sistema solar. Hoy día se conoce la existencia de más de 190 de estos objetos. La mayoría se ha hallado con telescopios de superficie, mediante el análisis del ligero movimiento que un planeta en órbita alrededor de una estrella induce en ésta. Tales observaciones sólo proporcionan una pequeña cantidad de información: el tamaño y la elipticidad de la órbita del planeta y un límite inferior de su masa.

El Hubble prosigue la indagación centrándose de aquellos planetas cuyos planos orbitales están alineados con nuestra línea de visión, por lo que periódicamente los vemos pasar ante sus estrellas y eclipsar parte de su luz. "Tránsito" se llama a este fenómeno. El seguimiento por el Hubble del primer planeta extrasolar al que se le haya observado en tránsito, el satélite de la estrella HD 209458, ha proporcionado la información más detallada sobre un planeta allende los límites del sistema solar. Es un 30 por ciento más ligero que Júpiter, aunque su diámetro es un 30 por ciento mayor, quizá porque la ingente radiación que recibe de su estrella lo expande. Los datos del Hubble logran una precisión tal, que habrían revelado anillos gigantes o satélites grandes alrededor del planeta, de haber existido; no los hay. Más aún: el Hubble ha realizado las primeras mediciones de la composición de un planeta que gira alrededor de otra estrella. Su atmósfera contiene sodio, carbono y oxígeno; el hidrógeno se está evaporando al espacio, lo que está creando una cola parecida a la de un cometa. Estas observaciones son precursoras de las investigaciones que buscarán señales químicas de vida en la galaxia.

DON DIXON (*ilustración*); NASA Y EQUIPO COMETARIO DEL TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE (*arriba*); NASA Y *STScI* (*abajo*)

3 La agonía de las estrellas

La teoría predice que una estrella cuya masa se encuentre entre 8 y 25 veces la solar terminará su vida en una explosión de supernova. Cuando la estrella consume el combustible útil, pierde de repente el combate que sin cesar había mantenido contra su propio peso. El núcleo se desploma y crea una estrella de neutrones —un remanente inerte e hiperdenso—; las capas exteriores de gas se expelen a una velocidad del 5 por ciento de la velocidad de la luz.

Es difícil probar esta teoría porque no ha habido ninguna supernova en nuestra galaxia desde 1680. Pero a falta de una supernova aquí, lo mejor es una lo más cerca posible, como la que el 23 de febrero de 1987 estalló en la Gran Nube de Magallanes, una de las galaxias satélite de la Vía Láctea. El Hubble no se había lanzado todavía, pero tres años más tarde estaba ya siguiendo el decurso del fenómeno. Pronto descubrió un sistema de tres anillos alrededor de la estrella que había explotado. El anillo central parece representar la cintura estrechada de una bocanada de gas con forma de reloj de arena; los anillos mayores serían los bordes de dos lóbulos con forma de lágrima, creados por la estrella decenas de miles de años antes de estallar. En 1994, el telescopio comenzó a ver una secuencia brillante de puntos lo largo del anillo central: correspondían al choque con el anillo del material expulsado por la supernova. La observación del anillo sigue esclareciendo las fases finales de la estrella.

Se admite que las estrellas de tipo solar mueren con menos violencia que las que tienen una masa mayor; sólo se desprenden de sus capas gaseosas externas en un proceso sin estallido explosivo, que tarda unos 10.000 años. Cuando el núcleo central caliente de la estrella queda expuesto, su radiación ioniza el gas eyectado, que brilla entonces con un verde (oxígeno ionizado) y rojo (hidrógeno ionizado) vibrantes; se tiene así una "nebulosa planetaria", denominación que puede inducir a confusión. Se conocen unas 2000. El Hubble ha captado estas estructuras complejísimas con un detalle sin precedentes.

Algunas de estas nebulosas exhiben un conjunto de anillos concéntricos, a la manera de una diana, lo que parece remitir a un proceso de expulsión episódico, no continuo. El tiempo transcurrido entre los episodios de expulsión, unos 500 años, parece demasiado largo para que se deba a unas pulsaciones dinámicas en las que la estrella se contraiga y expanda como consecuencia de un suave tira y afloja entre la gravedad y la presión del gas, y demasiado corto para responder a pulsaciones térmicas, en las que la estrella abandonase su estado de equilibrio. La naturaleza precisa de los anillos observados no se ha aclarado aún.

NASA, ESA, *STScI* Y CHRISTOPHER BURROWS (*imagen del Hubble*); DON DIXON (*izquierda*); NASA, ESA, HEIC Y EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE *STScI/AURA* (*derecha*)

4. CUANDO UNA ONDA DE CHOQUE procedente de la supernova 1987A rompe en un anillo de gas preexistente, en éste comienzan a brillar zonas calientes.



Reconstrucción artística

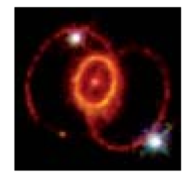


Imagen del Hubble

5. NEBULOSA DEL OJO DE GATO, una de las nebulosas planetarias más complejas. Las estrellas de tipo solar crean al morir formaciones gaseosas de esa clase.



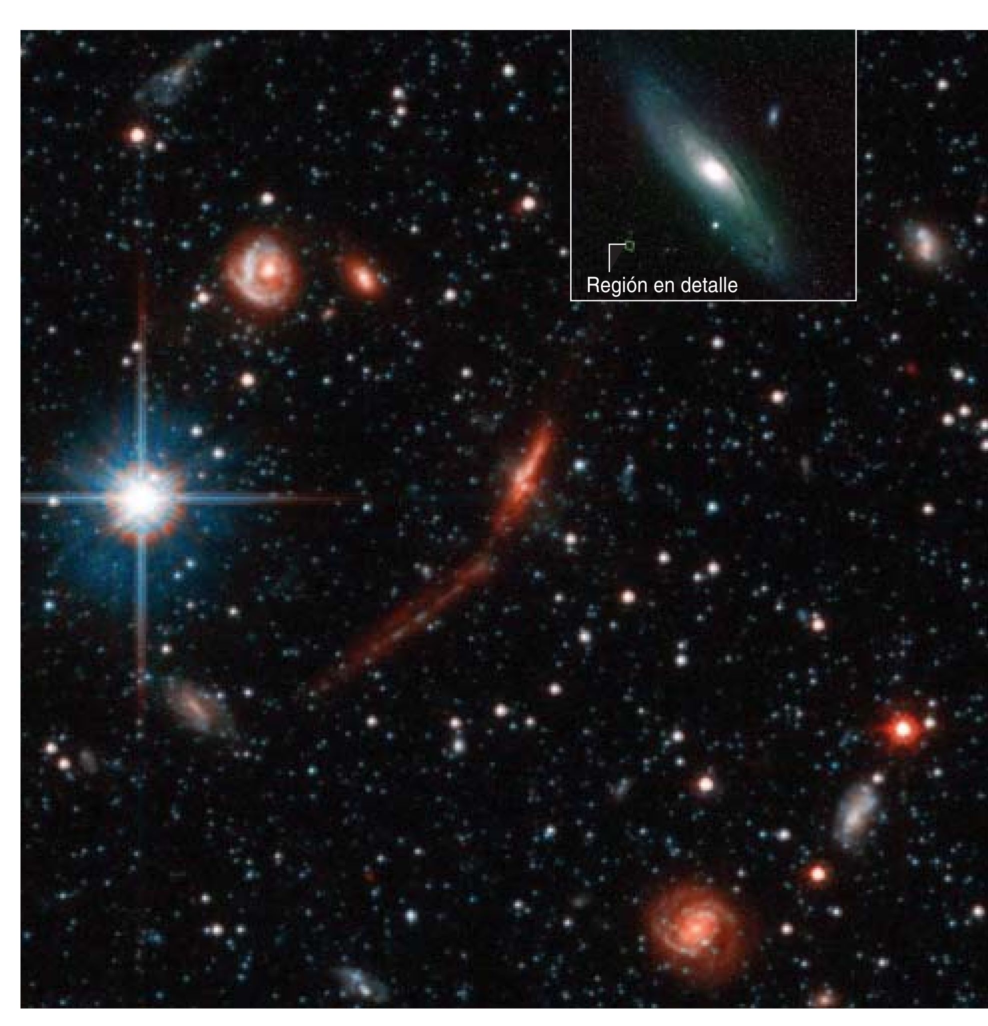
4 El nacimiento cósmico

Desde hace tiempo, se sabe que los chorros finos de gas indican el nacimiento de estrellas. Una estrella naciente puede emitir una pareja de chorros colimados (es decir, que no se abren) de varios años-luz de longitud. No se conoce el mecanismo de generación. Según la hipótesis mejor asentada, un campo magnético de gran escala atraviesa el disco de gas y polvo que rodea al objeto en gestación. La materia ionizada, forzada a moverse a lo largo de las líneas del campo magnético, sale disparada, cual si se tratara de cuentas ensartadas en un alambre giratorio. El Hubble ha respaldado esta teoría con pruebas directas de que los chorros se originan en el centro del disco.

El Hubble ha refutado, en cambio, otra hipótesis: que los discos circumestelares estaban tan sumergidos en sus nubes progenitoras, que resultaba imposible verlos. Ha tomado imágenes de docenas de discos protoplanetarios, con su silueta a menudo recortada contra la nebulosa. Al menos la mitad de las estrellas jóvenes observadas tienen discos, prueba de la ubicuidad en la galaxia de la materia prima con que se forman los planetas.



6. DISCOS DE POLVO informes, ameboides, rodean a los embriones de estrellas en la nebulosa de Orión. Cada imagen mide unas 2040 unidades astronómicas al cuadrado.



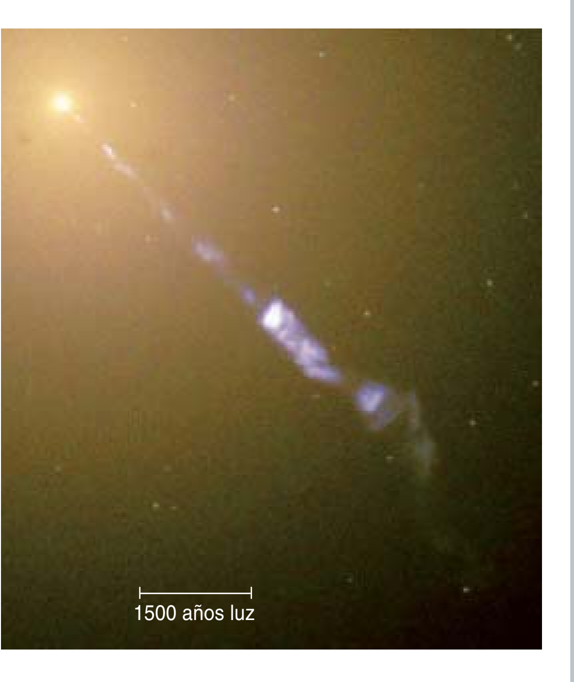
7. UNAS ESTRELLAS EXTRAÑAMENTE JOVENES de los alrededores de la galaxia de Andrómeda (recuadro) podrían ser restos de una colisión de galaxias. (En la imagen también se aprecian algunas galaxias de fondo.)

NASA, ESA Y T. M. BROWN *STScI (arriba)*; BILL SCHOENING, VANESSA HARVEY/REU PROGRAM/NOAO/AURA/NSF *(inserto)*; NASA, J. BALLY *Universidad de Colorado*, H. THROOP *Instituto de Investigación del Suroeste* Y C. R. O'DELL *Universidad de Vanderbilt (abajo)*

5 Arqueología galáctica

Se cree que las galaxias grandes, como la Vía Láctea y su vecina Andrómeda, se desarrollaron mediante la asimilación de galaxias menores. Este pasado azaroso queda escrito en las velocidades, composiciones, edades y disposiciones de las estrellas. El Hubble ha descifrado ese registro. Una de sus contribuciones fue la observación del "halo" estelar de Andrómeda, la tenue nube esférica de estrellas y cúmulos estelares que rodea al disco galáctico principal. Los astrónomos percibieron que las estrellas del halo presentaban un amplio abanico de edades: las más viejas tienen entre 11.000 y 13.500 millones de años; las más jóvenes, entre 6000 y 8000 millones. Estas últimas deben de proceder de alguna galaxia más joven (una galaxia satélite absorbida) o de alguna región más joven de la propia Andrómeda (es decir, del disco, si se ha fraccionado como consecuencia del paso de otra galaxia o de una colisión con ella). El halo de la Vía Láctea no contiene un número significativo de estrellas tan jóvenes. En consecuencia, aun cuando Andrómeda y la Vía Láctea presentan una estructura similar, los datos del Hubble señalan que han recorrido una historia diferente.

8. UN CHORRO DE PLASMA emerge de la galaxia M87. Lo origina un agujero negro de tres mil millones de masas solares que absorbe la materia de sus alrededores.



6 Agujeros negros supermasivos

Desde los años sesenta se viene sosteniendo que los cuásares y otros núcleos galácticos activos —núcleos brillantes y violentos de galaxias— reciben su energía de la absorción de materia por parte de sus agujeros negros gigantes. Las observaciones del Hubble apoyan esta idea. Casi todas las galaxias analizadas por el Hubble han resultado tener un agujero negro en su centro. Cabe destacar dos hallazgos. Primero, las imágenes de alta resolución de los cuásares muestran que esos objetos residen en galaxias elípticas brillantes o en galaxias que interaccionan entre sí; parece, pues, que se necesita cierta secuencia de sucesos para alimentar el agujero negro central. Segundo, la masa del agujero negro gigante guarda una buena correlación con la masa del bulbo esférico de estrellas que rodea el centro galáctico. Sugiere que la formación y evolución de la galaxia y de su agujero negro están íntimamente conectadas.

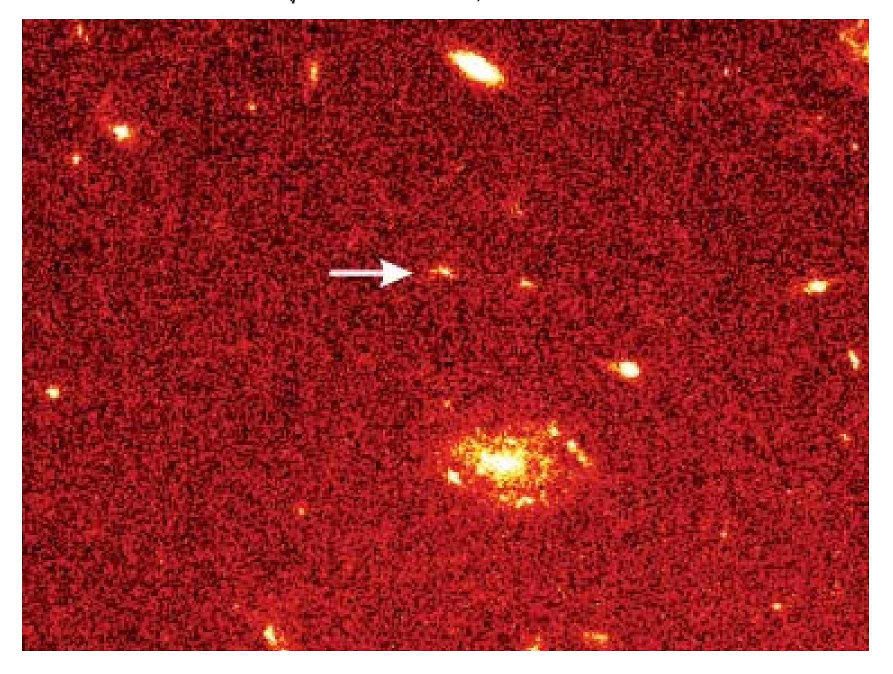
NASA Y EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE *STScI/AURA* (*arriba*); NASA, S. R. KULKARNI Y S. G. DJORGOVSKI *Instituto de Tecnología de California* Y EQUIPO DEL GRB DEL CALTECH (*abajo*)

7 Las mayores explosiones

Las erupciones de rayos gamma son breves destellos de rayos gamma: duran entre unos milisegundos y algunas decenas de minutos. Se distinguen dos tipos, en razón de la duración superior o inferior a los dos segundos; los más largos producen fotones de menor energía que los más cortos. Las detecciones del Observatorio Compton de Rayos Gamma, del satélite de rayos X BeppoSAX y de los observatorios terrestres han atribuido los brotes de larga duración al colapso de los núcleos de estrellas de gran masa y vida corta; en otras palabras, a un tipo de supernova. ¿Por qué sólo una pequeña fracción de las supernovas producen erupciones de rayos gamma? El Hubble ha encontrado que, si bien las supernovas suceden a lo largo y ancho de las regiones de formación estelar de las galaxias, las erupciones de larga duración se concentran en las regiones más brillantes, donde residen las estrellas de mayor masa. Y comparadas con las galaxias cuyas supernovas se han estudiado, las anfitrionas de las erupciones son bastante más débiles, más irregulares y menos dotadas de elementos pesados. Esto es importante porque las estrellas de gran masa deficientes en elementos pesados generan vientos estelares más débiles que los que emanan de las que sí son ricas en metales. En el transcurso de sus vidas retienen más masa y cuando mueren son más pesadas. El colapso de sus núcleos tiende a producir no una estrella de neutrones, sino un agujero negro. De hecho, los astrónomos atribuyen las erupciones largas a chorros colimados creados por agujeros negros de rotación rápida. Los factores decisivos que determinan si el colapso de un núcleo origina una erupción de rayos gamma parecen ser la masa y el ritmo de rotación de la estrella progenitora en el momento de su destrucción.

La identificación de los brotes de corta duración es más compleja. Hubo que esperar hasta 2005 para que los satélites HETE 2 y Swift localizaran algunas fuentes. El telescopio Hubble y el Observatorio Chandra de Rayos X descubrieron que los brotes de ese tipo liberan menos energía que los de larga duración y acontecen en una mayor variedad de galaxias, incluidas galaxias elípticas donde ya no se forman estrellas. Parece que las erupciones cortas no guardan relación con las estrellas masivas de vida corta, sino con sus carcasas. La hipótesis más verosímil sostiene que proceden de la fusión de dos estrellas de neutrones.

9. LA GALAXIA DONDE OCURRIO EL BROTE de rayos gamma 971214 aparece aquí como una modesta mancha (*próxima a la flecha*).





10. LAS GALAXIAS LEJANAS se distribuyen por el Campo Ultraprofundo del Hubble, miles de millones de veces demasiado débiles para que se las perciba a simple vista.

8 Los límites del espacio visible

Uno de los objetivos prioritarios de la astronomía es el conocimiento del desarrollo y evolución de las galaxias y de sus precursoras en tiempos tan cercanos a la gran explosión (*big bang*) como sea posible. Para hacerse una idea del pasado de la Vía Láctea, se fotografían galaxias de distintas edades, desde su infancia hasta la madurez. Con este fin, el Hubble, en coordinación con otros observatorios, toma exposiciones largas de regiones pequeñas del cielo —que reciben los nombres de Campos Profundos del Hubble, Campo Ultraprofundo del Hubble y Estudio Profundo de los Grandes Observatorios del Origen—. Ve así las galaxias más lejanas (y, por tanto, más antiguas).

Estas imágenes, de una sensibilidad extrema, nos han mostrado galaxias tal y como eran cuando el universo apenas contaba con unos pocos cientos de millones de años, un 5 por ciento de su edad actual. Las galaxias eran entonces más pequeñas y su forma más irregular, comparadas con las estructuras modernas. Es lo que cabe esperar si las galaxias de hoy resultan de la aglomeración de galaxias menores y no de la ruptura de estructuras mayores. Retroceder aún más en el tiempo es el objetivo principal del sucesor del Hubble, el Telescopio Espacial James Webb, en fase de construcción.

Estas observaciones han servido también para estudiar aumentos y descensos de la formación estelar en el universo a lo largo del tiempo cósmico. Parece que el ritmo de formación alcanzó su máximo hace unos 7000 millones de años y desde entonces se ha quedado en la décima parte. Cuando el universo era aún bastante joven —mil millones de años—, la tasa de formación estelar ya era alta, aproximadamente una tercera parte del pico.

9 La edad del universo

Las observaciones realizadas por Edwin Hubble y otros investigadores en los años veinte del pasado siglo mostraron que vivimos en un universo en expansión. Las galaxias se están distanciando entre sí sistemáticamente, lo que apunta a una dilatación del espacio. La constante de Hubble (H_0) es una medida del ritmo actual de la expansión, parámetro clave para determinar la edad del universo. El razonamiento es sencillo: H_0 es el ritmo de distanciamiento entre galaxias; por tanto, sin tener en cuenta aceleraciones o frenados que haya podido haber, el inverso de H_0 fija el tiempo en el que todas las galaxias habrían estado agrupadas. El valor de H_0 desempeña también una función en el crecimiento de las galaxias, la producción de elementos ligeros y el calendario de las distintas fases de la evolución cósmica. No sorprende, por tanto, que desde un principio la medición precisa de la constante de Hubble fuera el primer objetivo del telescopio espacial que lleva su nombre.

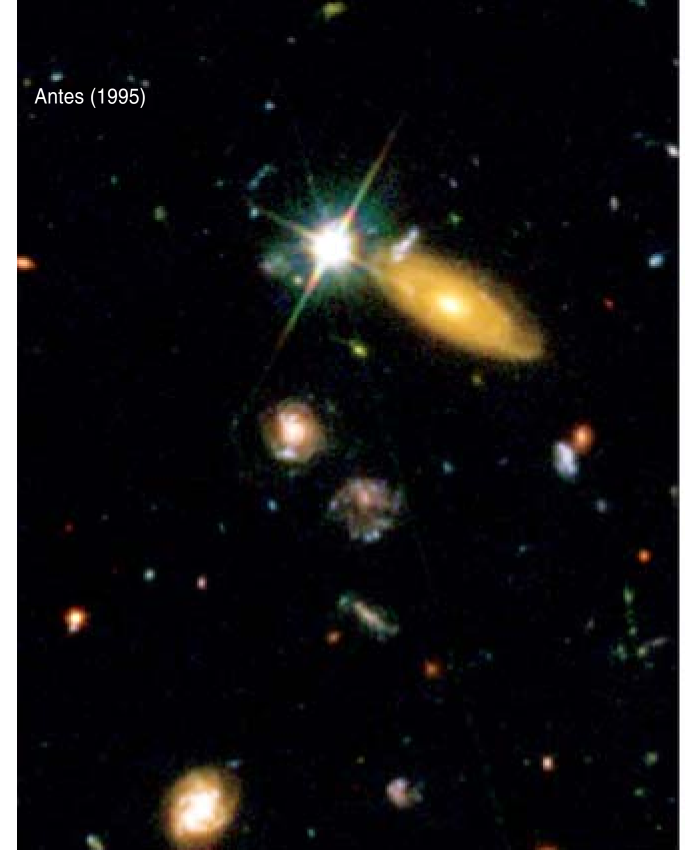
En la práctica, la determinación del valor de la constante requiere la medición de la distancia a las galaxias cercanas, tarea complicada y fuente de controversias a lo largo del siglo XX. El telescopio espacial estudió las variables cefeidas de 31 galaxias; las oscilaciones de su luz que caracterizan a estas estrellas revelan su brillo intrínseco y, por tanto, su distancia. El valor resultante de H_0 tiene una precisión del 10 por ciento. Junto con las mediciones del fondo cósmico de microondas, el valor de la constante de Hubble indica que la edad del universo es de 13.700 millones de años.

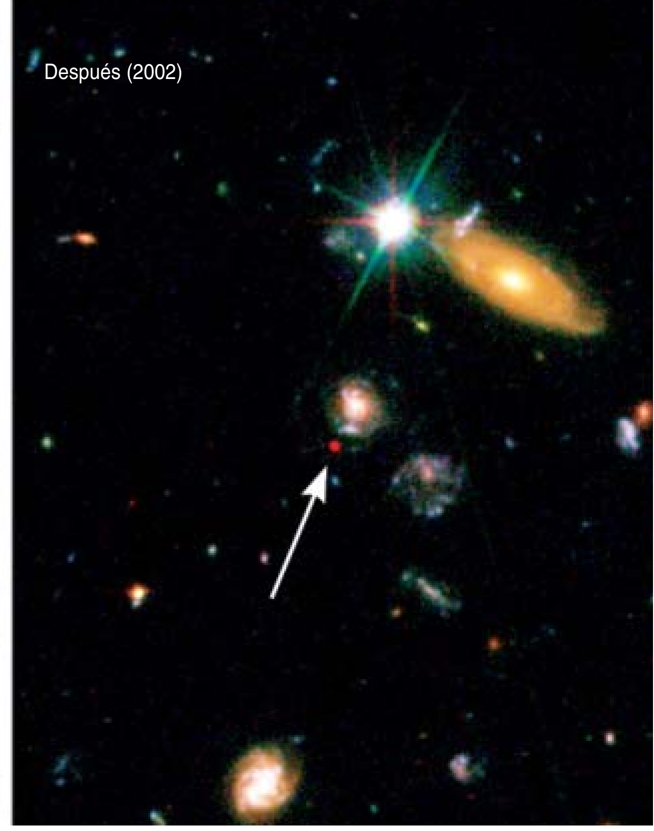




11. LAS PULSANTES ESTRELLAS CEFEIDAS, como las que aquí se dibujan, se toman por vara de medir las distancias intergalácticas.

NASA, ESA, S. BECKWITH *STScI* Y EQUIPO DEL CAMPO ULTRAPROFUNDO DEL HUBBLE (*arriba*); DON DIXON (*abajo*)





12. LAS SUPERNOVAS LEJANAS, descubiertas al comparar imágenes obtenidas en momentos diferentes, revelan la transición entre la deceleración y la aceleración cósmicas.

NASA Y J. BLAKESLEE *Universidad Johns Hopkins*

10 El universo en expansión acelerada

En 1998, dos equipos de astrónomos anunciaron, sin previo acuerdo entre ellos, un descubrimiento asombroso: la expansión del universo se está acelerando. Siempre se había pensado que el universo debía decelerarse: las galaxias se atraen mutuamente, por su fuerza de gravedad, y eso debería frenar la expansión incesante. Qué impulsa la aceleración es uno de los grandes misterios de la física moderna. La hipótesis de trabajo mantiene que el universo tiene una componente hasta ahora desconocida, la "energía oscura". Una combinación de observaciones del fondo de microondas y de datos tomados por el Hubble y por telescopios terrestres establece que casi las tres cuartas partes de la densidad total de energía del universo corresponden a energía oscura.

La aceleración comenzó hace cinco mil millones de años. Hasta ese momento la expansión se había estado frenando. En el año 2004, el telescopio Hubble descubrió 16 supernovas lejanas que abarcan esa transición crucial. Las observaciones en cuestión proporcionaron información muy útil para teorizar sobre la naturaleza de la energía oscura. La hipótesis más simple (aunque también la más misteriosa) argumenta que la energía oscura es una forma de energía del espacio mismo, presente incluso allí donde no hay nada. Hasta la fecha, no hay instrumento tan imprescindible como el Hubble para el descubrimiento de supernovas lejanas y el estudio de la energía oscura. Su papel en el análisis de la energía oscura es quizá la más poderosa de las razones que esgrimen los astrónomos para que la NASA lo mantenga activo algún tiempo más.

El autor

Mario Livio trabaja en el Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial en Baltimore.

Bibliografía complementaria

VELOCIDAD DE EXPANSIÓN Y TAMAÑO DEL UNIVERSO. Wendy L. Freedman en *Investigación y Ciencia*, n.º 196, enero 1993.

EL ENCUENTRO DEL COMETA SHOEMAKER-LEVY 9 CON JÚPITER. David H. Levy, Eugene M. Shoemaker y Carolyn S. Shoemaker en *Investigación y Ciencia*, n.º 229, octubre 1995.

LAS GALAXIAS DEL UNIVERSO JOVEN. F. Duccio Macchetto y Mark Dickinson en *Investigación y Ciencia*, n.º 250, julio 1997.

LOS PRIMEROS DÍAS DE LA VIDA DE UNA ESTRELLA. Thomas P. Ray en *Investigación y Ciencia*, n.º 289, octubre 2000.

SOMBRAS DE OTRAS TIERRAS. Laurance R. Doyle, Hans-Jörg Deeg y Timothy M. Brown en *Investigación y Ciencia*, n.º 290, noviembre 2000.

LAS EXPLOSIONES MÁS BRILLANTES DEL UNIVERSO. Neil Gehrels Luigi Piro y Peter J. T. Leonard en *Investigación y Ciencia*, n.º 317, febrero 2003.

ASOCIACIONES GALÁCTICAS. Kimberly Weaver en *Investigación y Ciencia*, n.º 324, septiembre 2003.

CUANDO LA ACELERACIÓN CAMBIÓ DE SIGNO. Adam G. Riess y Michael S. Turner en *Investigación y Ciencia*, n.º 331, abril 2004.

LA MUERTE DE LAS ESTRELLAS COMUNES. Bruce Balick y Adam Frank en *Investigación y Ciencia*, n.º 337, octubre 2004.



Células madre, ¿culpables del cáncer?

Un lado oculto de las células madre, su capacidad para tornarse malignas, constituye el origen de algunos tipos de cáncer, si no de muchos. Del seguimiento y destrucción de estas escurridizas células asesinas dependería la erradicación de la enfermedad

Michael F. Clarke y Michael W. Becker

Tras más de 30 años de guerra declarada contra el cáncer, se han cosechado victorias importantes. La tasa de supervivencia de ciertos cánceres infantiles alcanza hoy el 85 por ciento, cuando antaño el diagnóstico suponía una sentencia de muerte. Para otros procesos cancerosos existen nuevos medicamentos que, al menos, mantienen a raya la enfermedad, convirtiéndola en un mal con el que el paciente puede convivir. Por ejemplo, en 2001 se aprobó el Gleevec para el tratamiento de la leucemia mielógena crónica (LMC). El fármaco ha supuesto un éxito clínico notable: ha logrado que la enfermedad remitiera en numerosos pacientes. Con todo, éstos no han sanado, pues conservan un remanente de células malignas que se encargan de mantener la enfermedad.

Desde hace tiempo viene aceptándose la idea de que cualquier célula cancerosa que permanezca en el organismo podría reproducir la enfermedad. De ahí que los tratamientos actuales se centren en matar el mayor número posible de células cancerosas. Sin embargo, en numerosos casos el éxito de esta estrategia es todavía una cuestión de azar; para los pacientes que se encuentran en las fases avanzadas de los procesos cancerosos con tumores sólidos más frecuentes, la prognosis resulta desalentadora.

Además, hoy sabemos que en el caso de la LMC y otros tipos de cáncer sólo un pequeño porcentaje de las células del tumor poseen capacidad de producir tejido canceroso nuevo; la destrucción de tales células constituiría una forma mucho más eficaz de acabar con la enfermedad. Porque son el motor que impulsa el crecimiento de células cancerosas nuevas y, con toda probabilidad, el origen mismo del proceso canceroso, se denominan células madre cancerosas. Hay, sin embargo, quien piensa que estas células han sido células madre normales, o sus descendientes indiferenciados, que han sufrido un proceso de transformación maligna.

No es nueva esa idea de que una población restringida de células madre malignas produzca cáncer. La investigación sobre las células madre comenzó con los estudios realizados durante los años cincuenta y sesenta del siglo pasado sobre tumores sólidos y hemopatías. Gran parte de los principios que gobiernan la génesis y el desarrollo del tejido sano se descubrieron a través de la observación de cómo descarriaban los procesos normales.

El estudio actual de las células madre nos enseña a conocer mejor el cáncer. Desde hace medio siglo se vienen descubriendo múltiples aspectos de los mecanismos que regulan el comportamiento de las células madre normales y de la progenie celular que originan. Nuevos conocimientos que nos han permitido hallar jerarquías similares entre las células cancerosas que forman un tumor. Ello ofrece

DE LOS MILES DE CELULAS que forman un tumor, una puede tratarse de una célula madre cancerosa responsable de impulsar la enfermedad.

KENN BROWN

un respaldo sólido a la hipótesis según la cual, en el origen de cánceres de muy diversa índole, habría unas células díscolas del tipo de las células madre. Por tanto, la erradicación de las células madre cancerosas requiere, primero, entender mejor cómo una célula madre inocua se convierte en maligna.

Comportamiento correcto

El cuerpo humano es un sistema altamente compartimentado. Consta de órganos y tejidos, que llevan a cabo funciones esenciales para el mantenimiento de la vida. Sin embargo, las células que constituyen estos tejidos suelen tener una vida corta. La piel que cubre hoy nuestro cuerpo no es la misma que teníamos hace un mes porque, desde entonces, nuevas células epidérmicas han sustituido a las que se desprendieron. El revestimiento del intestino se renueva por completo cada dos semanas. Las plaquetas que ayudan a la coagulación de la sangre viven unos 10 días.

El mecanismo que mantiene una población constante de células operativas en estos tejidos es el mismo en todas las partes del cuerpo. Más aún: ha persistido entre las especies superiores. Lo dirigen pequeños reservorios de células madre con una vida larga, que operan a modo de fábricas: suministran células funcionales que sustituyen a las que se van perdiendo. El proceso de fabricación se ajusta a una serie de etapas sometidas a un control y organización estrictos; en cada nueva generación, la progenie de la célula madre gana en especialización.

Uno de los ejemplos que mejor ilustran este proceso nos lo ofrece la familia hematopoyética de células sanguíneas y células inmunitarias. Todas las células funcionales que se encuentran en la sangre y en la linfa proceden de un progenitor, común y único, que se aloja en la médula espinal: la célula madre hematopoyética (CMH). En adultos, la reserva de CMH representa menos del 0,01 por ciento de las células de la médula espinal; sin embargo, cada una de estas células genera una población mayor de células progenitoras con un grado de diferenciación intermedio. Estas, a su vez, se dividen y se van diferenciando ulteriormente, a través de varias etapas, hasta convertirse en células maduras encargadas de realizar tareas específicas: desde la defensa ante infecciones hasta el transporte de oxígeno a los tejidos. Para cuando una célula ha alcanzado su estado funcional definitivo, ha perdido ya toda su capacidad para proliferar o para cambiar su destino; se dice que está totalmente diferenciada.

Mientras tanto, las células madre permanecen indiferenciadas, un estado que mantienen merced a su exclusiva capacidad de autorrenovación. Para acometer la producción de tejidos nuevos, una célula madre se divide en dos. Una de las dos células hijas resultantes prosigue a lo largo de una ruta que conducirá a un mayor grado de especialización. La otra célula hija conserva las características de la célula madre. De este modo, la población total de células madre permanece constante, mientras que la proliferación de los progenitores intermedios permite que la población de determinados tipos de células hematopoyéticas se expanda con prontitud en respuesta a unas necesidades cambiantes.

La capacidad de las células madre para regenerarse a sí mismas mediante un mecanismo de autorrenovación constituye su principal característica distintiva. Las dota en exclusiva de un período de vida ilimitado y de la facultad de proliferar en el futuro. Por el contrario, las células progenitoras poseen cierta capacidad de autorrenovación durante la proliferación, pero dependen de un contador interno que limita el número de divisiones celulares. Conforme aumenta el grado de diferenciación, la descendencia de las células progenitoras pierde capacidad para multiplicarse.

Las consecuencias prácticas de estas diferencias se observan cuando las células madre hematopoyéticas, o sus descendientes, se trasplantan. Tras irradiar la médula ósea de un ratón para destruir su sistema hematopoyético nativo, las células progenitoras introducidas en la médula proliferan y restablecen la hematopoyesis de forma provisional; mas transcurridas entre cuatro y ocho semanas, esas células se extinguen. En cambio, una célula madre hematopoyética trasplantada restablece la totalidad del sistema circulatorio durante el resto de la vida del animal.

Desde hace más de 30 años conocemos la organización del sistema hematopoyético. En fecha reciente, se han identificado jerarquías celulares similares en otros tejidos humanos: el cerebro, las mamas, la próstata, los intestinos grueso y delgado y la piel. Estos tejidos comparten también los principios que regulan el comportamiento de las células madre, incluidos los mecanismos que controlan el número de células madre y que toman las decisiones referentes al destino de una célula individual. Algunos genes y las cascadas de procesos desencadenados por su actividad (o rutas génicas) desempeñan una función crucial a la hora de determinar, por ejemplo, el destino y la función de las células madre. Entre estas rutas de señalización se encuentran las encabezadas por los genes *Bmi-1*, *Notch*, *Sonic hedgehog* y *Wnt*. Con todo, quienes identificaron la mayoría de estos genes no fueron los científicos que estudiaban las células madre, sino los oncólogos, pues las mismas rutas génicas intervienen también en el desarrollo de procesos cancerosos.

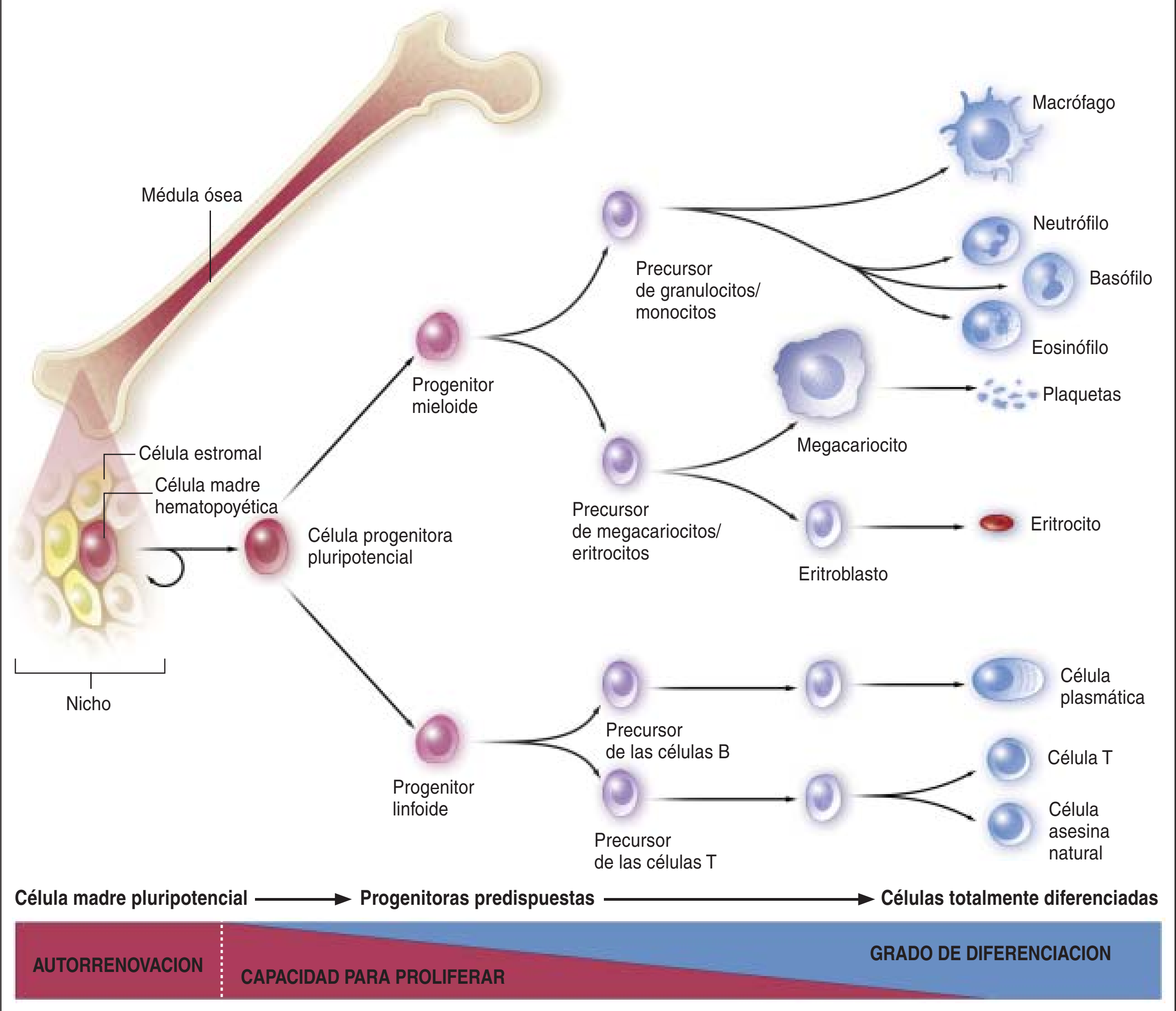
Se han descubierto múltiples semejanzas entre las células madre y las células cancerosas. La propia de-

Resumen/Células madre cancerosas

- Se halla muy extendida la idea de que todas las células cancerosas poseen idéntica capacidad para proliferar y propagar la enfermedad. La verdad es que, en numerosos tipos de cáncer, sólo un pequeño subconjunto de células tumorales cuenta con esa facultad.
- Las células tumorigénicas comparten algunos rasgos cruciales con las células madre: entre otros, una esperanza de vida ilimitada y la capacidad para generar una amplia gama de otros tipos celulares. Por ello se las considera células madre cancerosas.
- Se cree que estos progenitores malignos provienen de fallos en la regulación por parte de células madre lesionadas o de su progenie inmediata.
- Para erradicar la enfermedad, los tratamientos antitumorales deberían dirigirse contra las células madre cancerosas.

JERARQUIA DE LAS CELULAS HEMATOPOYETICAS

Las células madre del sistema hematopoyético (que forma la sangre) ilustran los principios que gobiernan la actividad de las células madre en otros tejidos. En la médula ósea, una pequeña población de células madre hematopoyéticas (CMH) dan origen a la mayoría de los tipos celulares inmunitarios y sanguíneos que circulan por el cuerpo humano. Las CMH residen en un entorno característico, rodeadas de células estromales que proporcionan señales reguladoras importantes para la célula madre. Ante la demanda de más células sanguíneas o inmunitarias, se divide una CMH para producir una célula hija que permanece en el nicho y mantiene su identidad (CMH de vida larga) y otra célula hija de vida corta, la célula progenitora pluripotencial (CPP). Luego, la CPP se divide para producir células progenitoras predispuestas para la generación de células del linaje mieloide (células sanguíneas) o del linaje linfoide (células inmunitarias). Conforme la descendencia de las células progenitoras se especializa, se produce una disminución programada de su capacidad para proliferar hasta que dejan de dividirse; se consideran entonces totalmente diferenciadas. Sólo las células madre conservan la facultad para proliferar de forma ilimitada, gracias a su capacidad para autorrenovarse indefinidamente, dividiéndose sin diferenciarse.



TAMI TOLPA

finición clásica de proceso canceroso incluye la manifiesta capacidad de la célula cancerosa para sobrevivir y multiplicarse de forma indefinida, para invadir tejidos colindantes y para migrar (metastatizar) a lugares distantes del organismo. Las limitaciones que en condiciones normales ejercen un fino control sobre la proliferación celular y la identidad parecen, pues, estar ausentes en las células cancerosas.

La facultad de las células madre normales para autorrenovarse las exime de las normas que limitan la esperanza de vida y la proliferación en la mayoría de las células. Merced a su capacidad para diferenciarse y generar una amplia gama de tipos celulares, las células madre forman todos y cada uno de los elementos que componen un órgano o sistema de tejidos. Los tumores se caracterizan también por la heterogeneidad de los tipos celulares que abarcan; un tumor vendría a ser la versión desordenada de un órgano. Igual que las células cancerosas, las células madre hematopoyéticas migran a regiones lejanas del organismo en respuesta a una señal de lesión.

En células madre sanas, la capacidad para crecer de forma ilimitada y diversificarse se mantiene a raya mediante una estricta regulación génica. Si se eliminasen estos mecanismos de control, nos encontraríamos con algo parecido a un proceso canceroso. Dichas características comunes, junto con un número creciente de datos experimentales, nos indican que los fallos en la regulación de las células madre son los responsables de la puesta en marcha, la autoperpetuación y la propagación de múltiples procesos cancerosos.

El talón de Aquiles

La presencia de células madre en ciertos tejidos, sobre todo en los que presentan una elevada tasa de recambio celular (el intestino o la piel, por ejemplo), nos plantea la existencia de un sistema demasiado complicado y poco eficaz para reemplazar las células viejas o dañadas. ¿No tendría más sentido que todas las células del organismo proliferaran cuando fuera necesario, para sustituir a sus vecinas dañadas? A simple vista, quizá sí, pero eso convertiría a cualquier célula en una célula cancerosa potencial.

Se cree que los procesos cancerosos surgen cuando una acumulación de alteraciones "oncogénicas" en genes cruciales para una célula provoca un crecimiento anormal y la transformación de esa célula. En general, las mutaciones génicas resultan de una lesión directa (por ejemplo, la exposición de la célula a radiaciones o a productos químicos) o, sencillamente, de un error aleatorio (verbigracia, cuando el gen se copia de forma incorrecta antes de la división celular). Puesto que en los órganos donde se desarrollan la mayoría de los cánceres las únicas células de vida larga son unas cuantas células madre, éstas constituyen un reservorio potencial menor para la acumulación de lesiones génicas que, andando el tiempo, desembocarían en cáncer. Para nuestro infortunio, dado que las células madre gozan de una vida tan larga, se convierten también en el repositorio más probable para este tipo de lesiones.

De hecho, la longevidad de las células madre explicaría por qué muchos cánceres se desarrollan decenios después de que los tejidos hayan quedado expuestos a radiaciones. (La lesión inicial puede ser sólo la primera de una serie de mutaciones necesarias para la transformación de una célula sana en maligna.) Además de acumular y conservar estas cicatrices oncogénicas, la enorme capacidad proliferativa de una célula madre la convierte en una candidata ideal para sufrir un proceso canceroso. Puesto que la naturaleza regula la autorrenovación de forma tan estricta, las células dotadas de esa capacidad necesitarían un número de mutaciones adicionales para sufrir una transformación maligna que sería menor que el requerido por las células desprovistas de esa capacidad.

Con estas consideraciones en mente, son varias las posibles rutas que conducen a la aparición de un proceso canceroso. En uno de los modelos propuestos, las mutaciones se presentan en las propias células madre; la consiguiente pérdida de control sobre la autorrenovación genera un conjunto de células madre predispuestas a convertirse en malignas. A continuación, las células madre o sus descendientes (la población de células progenitoras predispuestas) podrían experimentar eventos oncogénicos adicionales que desencadenasen la proliferación de las células malignas para formar un tumor.

Un segundo modelo sostiene que, en un principio, las mutaciones oncogénicas se desarrollan en las células madre, si bien las etapas finales de la transformación en cáncer ocurren sólo en las células progenitoras predispuestas. Este escenario requeriría la reactivación de la capacidad de autorrenovación que las células progenitoras habrían perdido.

Los datos actuales apoyan ambas hipótesis en distintos tipos de cáncer. Y hay al menos un ejemplo en el que intervienen los dos procesos, aunque en distintas etapas de la misma enfermedad. La leucemia mielógena crónica (LMC) corresponde a un cáncer de los leucocitos, desencadenado por la fusión impropia de dos genes. La inserción del gen fusionado resultante transforma en leucémica una célula madre hematopoyética normal. Si no se trata, la LMC avanza inexorable hacia una forma aguda de la enfermedad: la crisis blástica de la LMC. Catriona Jamieson e Irving Weissman demostraron que, en pacientes que han desarrollado la crisis blástica de la LMC, los procesos génicos adicionales que conducen a esta versión más virulenta de la enfermedad habían dotado de capacidad de autorrenovación a ciertas células progenitoras.

Persecución incesante

En el transcurso del último decenio, las pruebas de que las células madre se tornaban malignas y de que sólo ciertas células cancerosas compartían rasgos con las células madre reforzaron la hipótesis que atribuye la fuerza impulsora del crecimiento tumoral a una subpoblación de células cancerosas con características semejantes a las de las células madre. La teoría posee un historial más largo, pero en el pasado se carecía de las técnicas necesarias para someterla a contrastación.

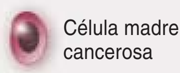
Hacia el decenio de los sesenta, algunos se percataron de que, en un mismo tumor, coexistían grupos de células que diferían en su capacidad para generar tejido tumoral nuevo. En 1971, C. H. Park y su equipo, de la Universidad de Toronto, demostraron que, en un cultivo de células procedentes de un mieloma original, o mieloma "primario" (un cáncer que afecta a las células plasmáticas en la médula ósea), las células exhibían diferencias notables en su capacidad para proliferar. En aquel tiempo, el grupo de Park no podía dar al fenómeno una interpretación taxativa. Cabía, al menos, dos explicaciones posibles: o bien todas las células podían haber tenido la capacidad para crecer en cultivo, aunque, debido al azar, sólo algunas de ellas lo hacían, o bien existía una jerarquía celular en el tumor y las células madre cancerosas generaban células no tumorigénicas, es decir, incapaces de proliferar.

Ya en 1967, Philip J. Fialkow, de la Universidad de Washington, había demostrado que, en el caso de la leucemia, el modelo de las células madre parecía ser el correcto. Mediante el uso del G-6-PD, un marcador de las proteínas de la superficie celular que identifica el linaje de una célula, Fialkow demostró, en algunas mujeres que padecían leucemia, que las células tumorigénicas y su progenie más diferenciada y no tumorigénica procedían de la misma célula progenitora.

POSIBLES RUTAS HACIA EL CANCER

En varios tipos de cáncer sanguíneo y en algunos tipos de tumores sólidos se ha demostrado la existencia de células madre cancerosas que promueven el desarrollo del tumor; sin embargo, no está claro todavía cuál es el origen de tales células madre malignas. Igual que una célula madre normal, una célula madre cancerosa muestra capacidad de autorrenovación (se divide sin diferenciarse); posee, por tanto, la facultad de generar un número ilimitado de las células diferenciadas anormales que constituyen el grueso de un tumor. El período de vida de esta progenie no tumorigénica (que no genera células cancerosas nuevas) es limitado.

El comportamiento de una célula madre normal se halla estrictamente regulado por su propia programación génica, que opera de forma concertada con las señales del entorno. Por tanto, los cambios en la manera en que las células madre portadoras de mutaciones en los genes "oncogénicos" responden a la señalización del nicho pueden desempeñar una función importante en la transformación final de la célula hacia un estado maligno (*a*, *b* y *c*). Por otra parte, las mutaciones de la célula madre pueden conservarse en sus descendientes inmaduros, las células progenitoras; éstas experimentan mutaciones ulteriores que reactivan la capacidad de autorrenovación, que, normalmente, sólo poseen las células madre (*d*). Se han encontrado indicios de todas estas posibilidades en diversos tipos de cáncer.





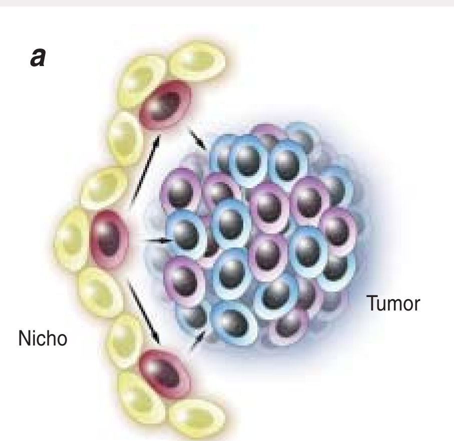

Célula progenitora anormal


Célula diferenciada anormal

Célula del nicho

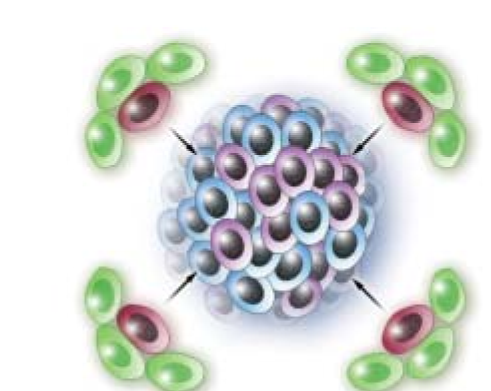

Célula del nicho alternativa

a



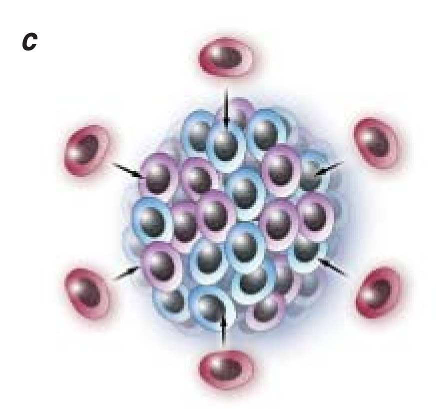
NICHO EXPANDIDO: Las células madre cancerosas portadoras de mutaciones oncogénicas se mantienen bajo control merced a las señales del nicho sano, hasta que una alteración posterior de las células o del nicho provoca la ampliación del medio en cuestión. En el nuevo entorno, mayor, las células madre malignas incrementan su propia población y, en consecuencia, el número de células anormales que generan.

b



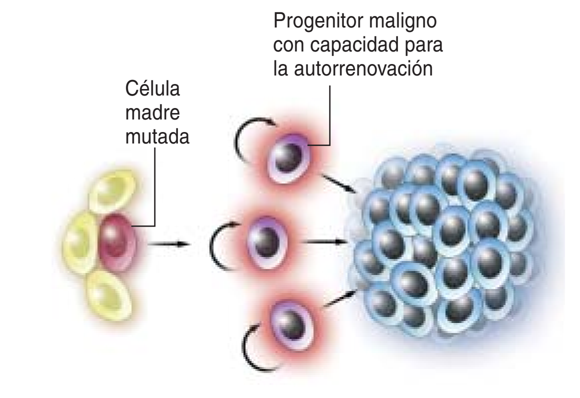
NICHO ALTERNATIVO: Las mutaciones oncogénicas de las células madre cancerosas les confieren la capacidad de adaptarse a un nicho nuevo. Las células madre cancerosas incrementan su número y su capacidad de proliferación, con lo que invaden tejidos colindantes o se trasladan, metástasis mediante, hasta lugares del organismo distantes.

c



INDEPENDENCIA DEL NICHO: La mutación hace que las células madre que ya están predispuestas a convertirse en malignas se tornen independientes de las señales del nicho; se liberan así de todos los controles ambientales que en condiciones normales operan sobre la autorrenovación y la proliferación.

d



MUTACION AUTORRENOVADORA: Las células progenitoras predispuestas a convertirse en malignas mediante mutaciones oncogénicas heredadas de sus células madre parentales experimentan mutaciones adicionales que restablecen su capacidad de autorrenovación. Así, estas células progenitoras adquieren un período de vida ilimitado y capacidad tumorigénica, lo que las convierte en células madre cancerosas.

TAMI TOLPA

Confinamiento de las células madre cancerosas

Mediante la clasificación de células cancerosas vivas y la determinación de si poseen la capacidad de autorrenovación se han identificado células madre cancerosas en poblaciones extensas de células cancerosas. En los tipos de cáncer que aparecen en la lista inferior se ha demostrado que las células madre malignas se autorrenuevan y regeneran todos los tipos celulares que conforman el tumor original. Esas propiedades sugieren que un pequeño número de células madre cancerosas habría originado la totalidad del tumor, iría reponiendo de forma continua su población celular (más numerosa y en su mayoría no tumorigénica) y reconstituiría el cáncer original, aun cuando se destruyera el tumor entero, o gran parte del mismo. La erradicación de la enfermedad requiere tratamientos dirigidos contra las células madre cancerosas.

TIPO DE CANCER (año en que se identificaron las células madre cancerosas)
Leucemia mieloide aguda (1994)
Leucemia linfoblástica aguda (1997)
Leucemia mielógena crónica (1999)
Mama (2003)
Mieloma múltiple (2003)
Cerebro (2004)
Próstata (2005)

Esos trabajos pioneros resultaron cruciales para el desarrollo del modelo de las células madre sobre el cáncer. Sin embargo, se encontraban limitados por la incapacidad de los investigadores para aislar y examinar distintas poblaciones de células en un mismo tumor. La comercialización, a principios del decenio de los setenta, del citómetro de flujo, un instrumento que selecciona de forma automática diferentes poblaciones de células vivas a partir de los marcadores específicos que presentan en su superficie, constituyó un hito en la biología de las células madre.

Un segundo hecho crucial en el avance de la investigación en el ámbito de las células madre cancerosas fue el desarrollo, en el decenio de los noventa, de tests de autorrenovación. Antes de que Weissman, de la Universidad de Stanford, y John Dick, de la Universidad de Toronto, desarrollaran métodos para el crecimiento de células madre humanas normales en ratones, no había sondas que permitiesen determinar la autorrenovación en células humanas. En 1994, mediante un citómetro de flujo y ese nuevo modelo de ratón, Dick comenzó a publicar una fecunda serie de artículos que mostraban la identificación de células madre cancerosas en la leucemia.

En 2003, Richard Jones, de la Universidad Johns Hopkins, identificó una población de células madre cancerosas en un mieloma múltiple. A principios de ese mismo año, nuestro grupo de la Universidad de Michigan en Ann Harbor había publicado la primera prueba de la presencia de células madre cancerosas en tumores sólidos. Mediante el trasplante en ratones de poblaciones de células procedentes de tumores de mama humanos, confirmamos que las células cancerosas de un cáncer de mama humano divergían en su capacidad para generar tejido tumoral nuevo. Sólo una subpoblación de las células volvía a crear el tumor original en el entorno nuevo.

A continuación, comparamos el fenotipo (los rasgos físicos) de los tumores nuevos con el de muestras tomadas de las pacientes. Descubrimos que el perfil de los tumores nuevos reproducía el del original. Lo que significaba que las células tumorigénicas trasplantadas no sólo se autorrenovaban, sino que generaban también todas las poblaciones celulares presentes en el tumor original, incluidas las células no tumorigénicas.

Nuestro estudio demostraba la existencia de una jerarquía celular en un cáncer de mama, semejante a las jerarquías que se habían identificado en los procesos cancerosos de la sangre. Desde entonces, la investigación sobre la biología de las células madre cancerosas se ha multiplicado, al paso que los laboratorios seguían descubriendo subpoblaciones similares de células tumorigénicas en otros tipos de cáncer.

En 2004, el grupo encabezado por Peter Dirks, de la Universidad de Toronto, identificó células procedentes de tumores primarios del sistema nervioso central humano que mostraban la capacidad de regenerar la totalidad del tumor en ratones. Descubrió, además, que en una de las formas de cáncer cerebral humano que crece con mayor celeridad, el meduloblastoma, el número de las células madre presumiblemente cancerosas superaba con creces el de células tumorigénicas halladas en otros tipos de tumores cerebrales menos agresivos.

El modelo de las células madre cancerosas halla respaldo también en un área afín, objeto de intensas investigaciones. El entorno de señalización, o nicho, en el que residen los tumores parece ejercer una influencia determinante sobre el inicio y el mantenimiento del proceso canceroso. Estudios realizados en células normales y en células madre han establecido la función esencial que desempeñan las señales emitidas por el tejido circundante y la matriz extracelular que lo sustenta, a la hora de preservar la identidad de una célula determinada y dirigir su comportamiento.

En efecto, las células normales extraídas de su contexto habitual en el organismo y colocadas en una placa de cultivo tienden a perder algunas de sus características funcionales diferenciales. Las células madre, en cambio, deben cultivarse en un medio que proporcione señales que les indiquen que deben permanecer indiferenciadas; de lo contrario, empiezan a proliferar rápidamente y a diferenciarse, dando a entender que éste es su comportamiento programado por defecto y que sólo las señales del nicho son capaces de reprimirlo.

En el organismo, los nichos de las células madre corresponden a enclaves rodeados de tipos celulares específicos; así, las células estromales, que forman el tejido conectivo en la médula ósea. Con pocas excepciones, las células madre permanecen siempre en su nicho; en ocasiones, se encuentran físicamente unidas al mismo mediante moléculas de adhesión. Por otra parte, las células progenitoras se alejan del nicho conforme aumenta su grado de diferenciación; a menudo lo hacen escoltadas por células guardianas.

La importancia de las señales del nicho a la hora de conservar el estado indiferenciado de las células madre y de mantenerlas en estado latente hasta que se las requiera para producir células nuevas sugiere que estas señales locales ejercerían un control regulador similar sobre las

células madre cancerosas. Se ha demostrado, por ejemplo, que las células madre predispuestas a desarrollar procesos cancerosos como consecuencia de mutaciones oncogénicas son, sin embargo, incapaces de producir un tumor cuando se trasplantan a un entorno nuevo. Y, a la inversa, células madre normales trasplantadas a un entorno tisular dañado previamente por medio de radiaciones, originan tumores.

Muchas de las rutas génicas relacionadas con la señalización entre las células madre y su nicho se han asociado también al cáncer. Lo que denuncia que el nicho interviene, además, en la transición final hacia el proceso canceroso. Por ejemplo, si las células madre malignas estuviesen controladas por el nicho y el nicho se alterase y expandiese, la población de células madre malignas dispondría también de espacio para crecer.

Podría ocurrir, asimismo, que ciertas mutaciones oncogénicas de las células madre cancerosas favoreciesen la adaptación de éstas a un nicho distinto, lo que permitiría, de nuevo, que su número aumentara y que ampliaran su territorio.

Y cabe una tercera posibilidad alternativa: que las mutaciones tornaran las células madre cancerosas en independientes de las señales del nicho, liberándolas del control del entorno sobre la autorrenovación y la proliferación.

Estrechando el cerco

Las implicaciones de un modelo de células madre para el cáncer, en nuestra forma de entenderlo y tratarlo, caen por su propio peso. Las terapias actuales se proponen abarcar todas las células tumorales. Sin embargo, nuestros estudios y los de otros han demostrado que sólo una fracción minoritaria de las células cancerosas goza de capacidad para reconstituir y perpetuar el proceso canceroso. Si las terapias tradicionales reducen el tamaño de un tumor sin afectar a estas células, es probable que el cáncer se reproduzca. Los tratamientos dirigidos específicamente contra las células madre cancerosas destruirían el motor que impulsa la enfermedad, dejando que las células no tumorigénicas que hubieran sobrevivido acabaran muriendo por sí mismas.

En la práctica clínica se dispone ya de pruebas que respaldan esta estrategia. Por ejemplo, tras una quimioterapia contra un cáncer de testículos se examina el tumor del paciente para evaluar los efectos del tratamiento. Si el tumor contiene sólo células maduras, el cáncer no suele recidivar; no hacen falta tratamientos adicionales. Pero si el tumor presenta un número elevado de células con aspecto inmaduro (es decir, que no están totalmente diferenciadas) es probable que el cáncer se reproduzca; en este caso, los protocolos aconsejan proseguir la quimioterapia. Queda por demostrar si esas células inmaduras corresponden a la descendencia reciente que delata la presencia de células madre cancerosas, pero su relación con la prognosis de la enfermedad es insoslayable.

Sin embargo, las células madre no se identifican sólo por su aspecto. Para ahondar en las propiedades de las células madre cancerosas se requieren técnicas más refinadas para aislar y caracterizar estas células tan poco frecuentes. Una vez conocidas sus características distintivas, esa información nos valdrá para desarrollar tratamientos a medida contra las mismas. Si, por ejemplo, se descubriera la mutación o el factor ambiental que dota a un tipo concreto de célula madre cancerosa de la capacidad para autorrenovarse, aquélla o éste se convertiría en una diana obvia para inutilizar tales células tumorigénicas.

Craig T. Jordan y Mónica L. Guzmán, de la Universidad de Rochester, han demostrado ejemplos alentadores de esta estrategia. En 2002, identificaron las características moleculares de las células madre malignas que, al parecer, provocaban la leucemia mieloide aguda (LMA); demostraron que las células madre cancerosas eran el objetivo preferente para determinados fármacos. En 2005, descubrieron que un compuesto procedente de la planta matricaria (*Tanacetum parthenium*) induce a las células madre de la LMA a suicidarse, al tiempo que deja intactas a las células madre normales.

Algunos grupos de investigación confían en adiestrar a las células inmunitarias para que reconozcan y persigan a las células madre cancerosas. Otros están considerando el empleo de medicamentos ya existentes para alterar la señalización en el nicho, con la esperanza de privar a las células madre cancerosas de las directrices ambientales que promueven su proliferación. Y se está explorando el desarrollo de fármacos que obliguen a las células madre cancerosas a diferenciarse, privándolas así de su capacidad de autorrenovación.

Por fin, los expertos en cáncer se hallan tras la pista del sospechoso. Con una combinación de estrategias encaminadas, por un lado, a operar sobre las rutas génicas que se encargan del mantenimiento de las células madre y, por otro, a interponerse en el intercambio de señales que se produce entre las células tumorales y su entorno, esperamos encontrar y detener pronto a los verdaderos culpables del cáncer.

Los autores

Michael F. Clarke y **Michael W. Becker** colaboraron en la Universidad de Michigan en Ann Harbor, donde en 2003 aislaron células madre procedentes de un tumor de mama. Clarke enseña en el Instituto Stanford de Biología de las Células Madre y Medicina Regenerativa. Se dedica a la identificación de células madre cancerosas y al estudio de los mecanismos de regeneración celular. Becker da clases en la Universidad de Rochester. Trabaja en la caracterización de células madre leucémicas y en el trasplante de sangre periférica y de médula ósea.

Bibliografía complementaria

THE REVERSAL OF TUMOR GROWTH. Armin C. Braun en *Scientific American*, vol. 213, n.º 5, págs. 75–83; noviembre 1965.

THE PROTEUS EFFECT: STEM CELLS AND THEIR PROMISE FOR MEDICINE. Ann B. Parson. Joseph Henry Press, 2004.

CONTEXT, TISSUE PLASTICITY, AND CANCER: ARE TUMOR STEM CELLS ALSO REGULATED BY THE MICROENVIRONMENT? Mina J. Bissell y Mark A. LaBarge en *Cancer Cell*, vol. 7, págs. 17–23; enero 2005.

LEUKAEMIA STEM CELLS AND THE EVOLUTION OF CANCER-STEM-CELL RESEARCH. Brian J. P. Huntly y D. Gary Gilliland en *Nature Reviews Cancer*, vol. 5, n.º 4, págs. 311–321; abril 2005.

STEM CELLS AND CANCER: TWO FACES OF EVE. Michael F. Clarke y Margaret Fuller en *Cell*, vol. 124, págs. 1111–1115; 24 de marzo 2006.

Cometas

Tras la huella química del sistema solar primitivo

Durante siglos se creyó que los cometas eran portadores de desgracias y mala fortuna, aunque los científicos y filósofos siempre trataron de entender qué eran y de dónde venían. Hoy, vemos a los cometas como cuerpos transportadores de hielos y material orgánico que se ha ido incorporando a la formación de los planetas desde el origen de nuestro sistema solar.

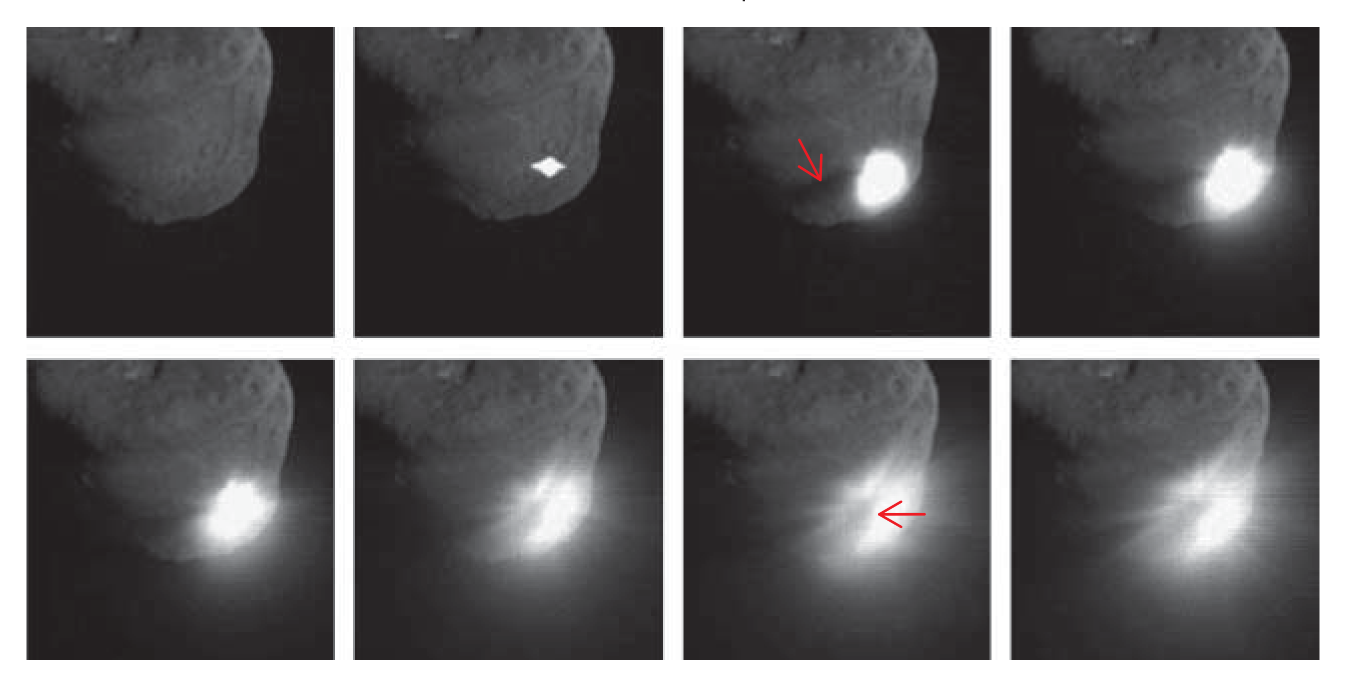
Por lo general, los cometas poseen un núcleo de pequeño tamaño (unas pocas decenas de kilómetros). Cuando se hallan en las cercanías del Sol, expulsan el material que forma la coma. El 4 de julio de 2005 la sonda "Deep Impact" penetró bajo la superficie del cometa 9P/Tempel 1 en busca de la huella química de los orígenes de nuestro sistema solar. Decenas de telescopios terrestres y espaciales estudiaron el material que salió a la superficie; las colaboraciones internacionales han desempeñado una función crucial en esta misión. En concreto, desde el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma, se realizó un seguimiento exhaustivo del evento.

A las 5:44:35.4 TU (tiempo universal u hora de Greenwich) del 4 de julio de 2005 el proyectil de la sonda hacía blanco sobre la superficie del cometa 9P/Tempel 1 a una velocidad de entre 7 y 10 kilómetros por segundo. Creó un cráter de más de 100 metros de diámetro. La cámara de alta resolución temporal, instalada a bordo de la nave nodriza, tomó multitud de imágenes en los 10 segundos inmediatamente posteriores al impacto. Sólo 20 minutos después llegaban las primeras imágenes, tomadas desde satélites, de la nube que se había creado en el choque. Más tarde, con telescopios terrestres, se obtenían imágenes de esa nube, que siguió expandiéndose a una velocidad de 200 metros por segundo hasta alcanzar un tamaño máximo, el 7 de julio, de 30.000 km en dirección al Sol.

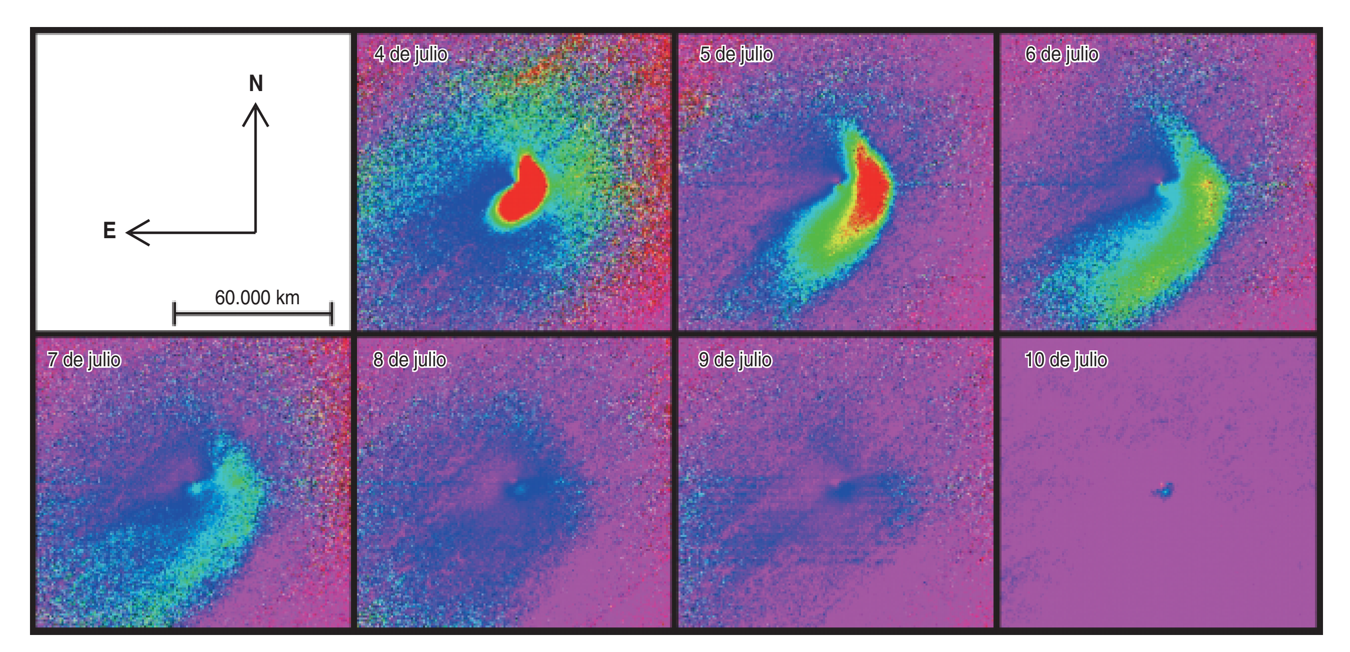
Gracias a estas imágenes y a los modelos de impacto que se han aplicado se ha podido conocer la masa total del núcleo y su densidad, $7{,}2 \times 10^{13}$ kg y 620 kg/m^3, respectivamente.

La evolución del cometa 9P/Tempel 1 se siguió desde los tres grandes telescopios del observatorio del Roque de los Muchachos, el WHT, TNG y NOT, con el fin de observar simultáneamente en el rango visible e infrarrojo, así como para efectuar una espectroscopía de baja resolución. Los resultados preliminares de dichas observaciones muestran que el cometa retoma su estado normal después del 7 de julio; de ello se deduce que el choque no generó ninguna nueva región activa (chorros) o que, si existió alguna actividad, desapareció rápidamente después del impacto.

Los espectros obtenidos, en los instantes posteriores al impacto, desde Mauna Kea con los telescopios Keck-2, Subaru y Gemini-N revelaron que la abundancia de agua e hidrocarburos (fundamentalmente C_2H_6,



1. Secuencia de 8 imágenes, tomada por la cámara de alta resolución temporal, que muestra los 0,84 segundos después del impacto. Las flechas rojas señalan zonas de oscurecimiento debido al polvo.



2. Secuencia de imágenes tras el impacto donde se aprecia la evolución de la coma de polvo del cometa. Imagen tomada con el telescopio NOT del observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma).

CH_3OH, CO, H_2CO, C_2H_2, HCN y CH_4) aumentaba sustancialmente justo después del choque. Estas mediciones concuerdan con las observaciones en radio, que captaron aumentos de flujo de hasta el 20 % en las bandas de transición de estas moléculas. En definitiva, el interior del cometa contiene hielo de agua e hidrocarburos, que no son tan evidentes en su superficie.

Por otro lado, una de las propiedades más interesantes en el estudio de la física cometaria es el polvo: tamaño y composición. Dada la emisión térmica de estas partículas entre los 3 y los 13 µm de longitud de onda, la espectroscopía en infrarrojo medio desempeña una función muy importante. Los espectros obtenidos antes del impacto se mostraban esencialmente planos entre 8 y 13 µm; con ello, los modelos estimaban que los granos de polvo debían medir más de 1 µm. Sin embargo, los espectros posteriores al impacto revelaron un sustancial aumento en esta banda, lo que sugiere que el impacto había llenado la coma del cometa con granos de entre 0,5 y 1 µm.

La composición química del polvo se obtuvo mediante el modelado del perfil de emisión en estas bandas. Resultó ser una amalgama rica en olivinas, piroxenos y carbono. El grado de cristalinidad del polvo aumentó muy significativamente después del impacto. Los estudios sobre el cambio en la polarización de la luz procedente de la coma del cometa así lo demuestran: el tamaño del grano cambió; lo hicieron también su composición química y su porosidad.

Hoy en día sabemos que los cometas residen principalmente en dos reservas, la nube de Oort y el cinturón de objetos transneptunianos, restos ambas de la nube protoplanetaria primigenia que dio lugar al sistema solar. La nube de Oort alberga más de un billón de núcleos cometarios en una capa esférica que se extiende entre 10.000 y 50.000 veces la distancia de la Tierra al Sol (o "unidades astronómicas"). Por otro lado, el cinturón transneptuniano adopta una forma discoidal; en él, unos mil millones de núcleos orbitan a distancias entre 40 y 500 o 600 unidades astronómicas.

Los estudios comparados del cometa Tempel 1 (de origen transneptuniano) y otros procedentes de la nube de Oort, como Hale-Bopp, Hyakutake, Ikeya-Zhang, Lee o Halley, revelan composiciones químicas y abundancias químicas muy similares, así como signos de estratificación en el núcleo. Por ahora sólo hemos obtenido los primeros resultados, pero los estudios sobre el Tempel 1 parecen indicar que los objetos del cinturón transneptuniano y los de la nube de Oort tienen su origen en una región común del disco protoplanetario. La gravedad de Júpiter captó el Tempel 1 en su caída hacia el interior del sistema solar; lo convirtió en un escenario excelente para el estudio del sistema solar primitivo y a la misión "Deep Impact", en una de las herramientas más útiles para este propósito.

RAFAEL BARRENA DELGADO
Instituto de Astrofísica de Canarias
JAVIER LICANDRO GOLDARACENA
Instituto de Astrofísica de Canarias
y Grupo de Telescopios Isaac Newton

La acústica de una sala de conciertos

Predicción mediante modelos de ordenador

La potencia de las teorías físicas se plasma en su capacidad de predicción, que valida la teoría o modelo físico utilizado. Cuando todos los aspectos del fenómeno físico están razonablemente bien cuantificados, es posible predecir el resultado final mediante simulaciones computacionales. Tanto mejor será la predicción cuanto mejor sea el conocimiento de los múl-

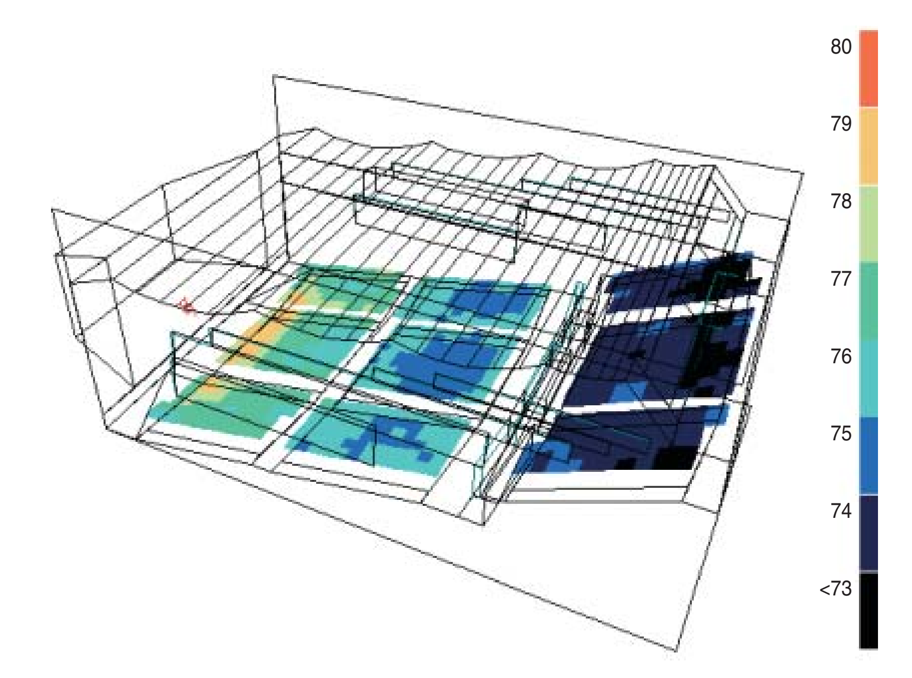
tiples aspectos físicos involucrados en el problema.

Para predecir el comportamiento acústico de una sala sinfónica en su fase inicial de diseño, es decir, para predecir el valor de los principales parámetros acústicos que la calificarán, se utilizan programas de simulación acústica de recintos. En su desarrollo actual, tales programas anticipan con aceptable precisión los parámetros acústicos más importantes y permiten detectar situaciones indeseables (ecos *flutter* —reflejos entre paredes paralelas—, zonas apagadas, etc., resolubles en la fase de diseño). Con ellos incluso se puede oír el resultado final en cualquier punto de la sala y para cualquier tipo de música mediante técnicas de "auralización", de plasmación sonora de los resultados de la simulación. No obstante, hay varios aspectos que deben mejorarse.

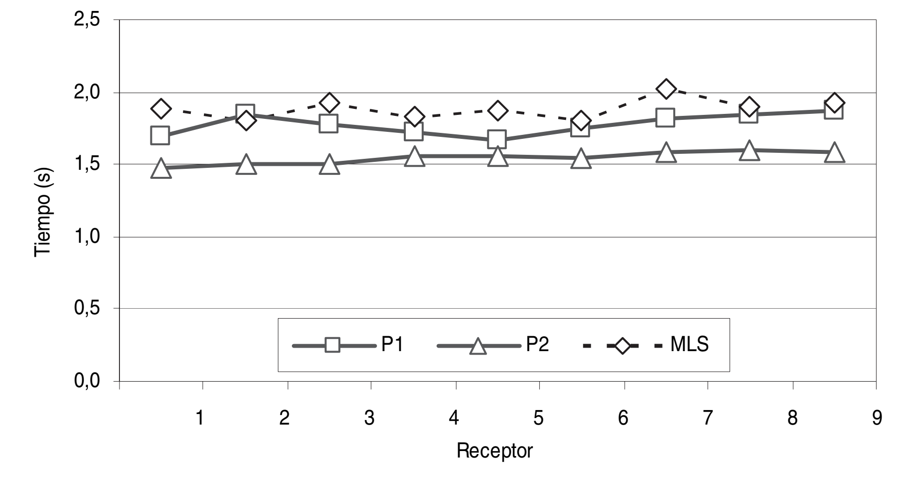
Partamos de un pulso emitido por una fuente sonora (voz o instrumento musical) en una determinada posición del escenario. La potencia espectral, o reparto de la potencia de una emisión entre las distintas frecuencias que la compongan, dependerá del tipo de fuente y del registro en que emita. También la direccionalidad, la distribución energética espacial de los rayos sonoros emergentes, dependerá de ambas variables. El sonido directo oído en un punto será el producido por el rayo emergente en la dirección fuente-receptor. Su atenuación se deberá tanto al efecto de divergencia como a las características absorbentes del aire. En tiempos posteriores (generalmente, muy próximos) se reciben sonidos procedentes de las múltiples reflexiones que llegan al receptor. Decenas de miles de tales sonidos que siguen al directo conforman, junto con éste, la percepción sonora. La distribución energética en las diferentes bandas del audio de tal respuesta impulsiva caracterizará la acústica del local como "seca", "brillante", "cálida", etc. El principal problema estriba en conocer el valor preciso de los parámetros implicados (coeficientes de absorción y difusión) para cada una de las reflexiones. Las simulaciones se basan en la "acústica geométrica", que divide el frente de ondas en rayos y analiza la trayectoria de cada uno de ellos. Introducir las características ondulatorias del fenómeno nos llevaría a tiempos de computación impracticables.

La sala sinfónica del Palacio de Congresos y Auditorio de Navarra Baluarte se inauguró en 2005. De planta rectangular y con un volumen de 20.000 m^3, tiene capacidad para 1552 personas. El área del escenario es de 520 m^2 y el foso para orquesta admite cien músicos. Su principal material es el haya (madera y contrachapado). Los asientos poseen una fina perforación con propiedades absorbentes.

Se utilizaron dos programas comerciales de simulación acústica para predecir las características acústicas de la sala en su fase de diseño. Cada uno simuló 50.000 rayos para la fuente acústica (colocada en una



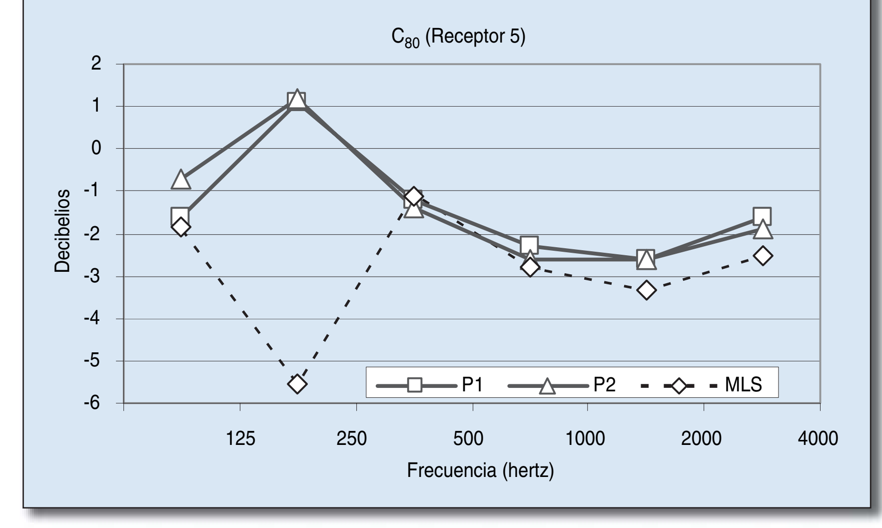
1. Distribución de la potencia sonora (en decibelios) para una banda ancha de frecuencias, en la zona del público, según la evaluó uno de los dos programas que se han comparado con las mediciones reales del comportamiento de la sala de conciertos del Palacio de Congresos y Auditorio de Navarra Baluarte, en Pamplona.



2. La comparación entre los tiempos de reverberación predichos por los dos programas comparados (P1 y P2), en nueve posiciones distintas, con los obtenidos experimentalmente (mediante la técnica MLS) para la banda de octava centrada en 500 hertz arroja un grado de coincidencia considerable.

CLARIDAD MUSICAL

La impresión de claridad musical consiste en la capacidad de discriminar nítidamente las distintas notas de una rápida sucesión. Puede medirse objetivamente comparando la energía que le llega primero al oyente, directamente desde la fuente, con la energía reverberante que va percibiendo después. En concreto, suele utilizarse el parámetro C80, diez veces el logaritmo de la razón de la energía que el oyente recibe en los primeros 80 milisegundos y la que le llega a continuación (se mide en decibelios). Esta gráfica muestra los valores de la claridad musical, en función de la frecuencia del sonido, predichos por dos programas informáticos (P1 y P2) y los correspondientes valores experimentales, obtenidos con la técnica MLS, para el quinto de los nueve receptores con que se midió la respuesta acústica de la sala del Baluarte. La discrepancia en la banda de 250 hertz ha de atribuirse a la atenuación selectiva del sonido en bajas frecuencias al pasar, con incidencia rasante, sobre las filas de asientos, fenómeno típicamente ondulatorio que los programas de simulación no reflejan bien.



posición representativa del escenario) y 65 reflexiones para cada rayo. Los programas de simulación predijeron correctamente la mayoría de los parámetros acústicos de la futura sala sinfónica.

Una vez terminada la construcción, se midieron los parámetros acústicos con la técnica MLS (acrónimo de *Maximum Length Sequence*), que se basa en una secuencia cuasialeatoria de impulsos, sonoros en este caso, y conforme a la norma ISO 3382, que determina las condiciones en que debe efectuarse una medición de la respuesta de una sala a los impulsos acústicos. Una de las condiciones de esa norma internacional es que la fuente sea omnidireccional. Su potencia acústica espectral fue igual a la utilizada en la simulación. Se compararon los valores de múltiples parámetros acústicos predichos por los dos programas de simulación con los obtenidos experimentalmente en nueve posiciones diferentes, representativas de diferentes posiciones del público en la sala.

Para numerosos parámetros, los resultados predichos y experimentales guardan una buena similitud. Sin embargo, cuando predomina la influencia de los fenómenos propiamente ondulatorios, pueden diferir notablemente. La correcta simulación de los efectos típicamente ondulatorios, junto con un mejor conocimiento de los coeficientes de difusión (diferenciando su tratamiento para las distintas frecuencias), supondría una notable mejora en la simulación del campo acústico en recintos cerrados.

RICARDO SAN MARTÍN MURUGARREN
y MIGUEL ARANA BURGUI
Laboratorio de Acústica,
Departamento de Física,
Universidad Pública de Navarra

Esperanza Cano Sánchez y Pablo J. López González



1. Esta araña de mar debe su nombre al estrecho parecido con algunos arácnidos. Unas patas alargadas y un cuerpo reducido les confieren un aspecto característico entre los organismos bentónicos.

Arañas de mar

Los picnogónidos, artrópodos marinos denominados también arañas de mar por su parecido con algunos arácnidos, presentan, en su mayoría, cuatro pares de patas alargadas en un cuerpo pequeño. Por el interior de esos apéndices discurre parte del sistema reproductor y digestivo. Medran en todas las profundidades, de la superficie al lecho oceánico, y en todas las latitudes, de los polos al ecuador. Aunque el tamaño corporal apenas suele alcanzar los 10 milímetros, algunas especies polares y de aguas profundas llegan a los 40 e incluso a los 70 centímetros de envergadura.

Con frecuencia se hallan asociados a otros animales, sobre todo a invertebrados sésiles o de movimientos lentos. Aunque los hay que se alimentan de algas, microorganismos y detritus acumulados en hidroideos o briozoos, la mayoría son carnívoros: viven de hidroideos, corales blandos, anémonas, pequeños poliquetos, esponjas y otros animales de cuerpo blando. Los moluscos son los principales hospedadores de las especies parásitas.

Algunas especies de picnogónidos sirven de soporte a una rica epifauna. No es raro encontrar grupos numerosos de moluscos gasterópodos instalados sobre el pequeño cuerpo del artrópodo, donde realizan también sus puestas. En otros casos constituyen un sustrato ideal para foraminíferos, cirrípedos, briozoos, endoproctos, hidrozoos y otros grupos sésiles. Apenas si se conocen las relaciones entre los picnogónidos y sus hospedadores.

Los picnogónidos constituyen uno de los pocos grupos animales en los que el cuidado de la puesta se cede al macho, en cuya presencia la hembra libera los óvulos. El macho los fecunda y los recoge en sus patas ovígeras; forma con ellos una masa, con la ayuda de una glándula cementante, presente en su fémur, y de unos pelos de la parte interna de sus segmentos. Llevará los huevos consigo hasta que eclosionen. Un macho puede transportar varias masas procedentes de hembras distintas.

El huevo eclosiona en larva protoninfon. Consta todavía de sólo tres pares de apéndices con tres segmentos, quelíforos, palpos y patas ovígeras. Se distingue una proboscis, muy corta, pero faltan los segmentos del tronco. Ese primer estadio larvario puede tomar diversos rumbos, según la especie de que se trate: vivir libre y desarrollarse independiente del parental, asociarse como parásito a otro organismo (como hidrozoos o corales) hasta emerger como juvenil, sufrir una serie de mudas en las cuales todos los apéndices aparecen a la vez, o no alimentarse y permanecer unida a las patas ovígeras del macho progenitor y desarrollar varias mudas hasta quedar libre una vez alcanza el cuarto o quinto estadio.

Los picnogónidos crecen durante toda su vida. Las patas se desarrollan a un ritmo superior al de cualquier otra estructura corporal; ello les proporciona ventajas anatómicas y funcionales, a la vez que facilita su desplazamiento.

PABLO J. LOPEZ



2. Los picnogónidos son animales de movimiento lento. Muchos de ellos se instalan sobre su fuente alimentaria, a menudo un invertebrado sésil. En la imagen, un ejemplar sobre una colonia de alcionáceo.



3. El gasterópodo *Dickdellia labioflecta* medra en grupos de hasta doce individuos sobre el cuerpo del picnogónido, donde también fija sus masas de huevos.



4. Cirrípedos, hidrozoos, briozoos o foraminíferos colonizan el cuerpo de algunas especies de picnogónidos sin causar grandes molestias al artrópodo. En el fémur de las patas de esta hembra se observa, por transparencia, parte del sistema reproductor.

5. Los machos son los responsables de cuidar de los huevos hasta su eclosión. Se sirven para ello de un par de apéndices especializados, las patas ovígeras.

PABLO J. LOPEZ

Jeffrey Sachs

Ecología y conmoción política

Cualquier pequeño cambio climático puede originar guerras, desestabilizar gobiernos y destruir economías ya castigadas por la pobreza, la corrupción y el conflicto étnico

Un minucioso análisis histórico de los registros climáticos ha demostrado que cualquier alteración del sistema, por leve que sea, puede tener importantes consecuencias; a esta respuesta no lineal ha venido a denominársela "cambio climático brusco". Menos sabido es que nuestros sistemas sociales y económicos son también muy sensibles a las perturbaciones climáticas. Fluctuaciones aparentemente modestas de las precipitaciones, la temperatura y otros factores meteorológicos pueden causar estragos en sociedades vulnerables.

En los últimos años se ha demostrado que los cambios en las precipitaciones pueden derrocar gobiernos e incluso desencadenar guerras: el dramático ejemplo del Sahel, al sur del Sahara, es una muestra de ello. La carnicería ocurrida en Darfur, Sudán, que se analiza casi siempre en términos políticos y militares, tiene sus raíces en una crisis ecológica que arranca directamente de fenómenos climáticos. Darfur es una zona árida donde cohabitan poblaciones de pastores (de cabras, ganado bovino y camellos) y de granjeros sedentarios, cada vez más numerosas y empobrecidas. Ambos grupos dependen de la lluvia para sobrevivir. El promedio de precipitaciones probablemente haya descendido en las últimas décadas pero, en cualquier caso, es muy variable, lo que hace de Darfur un lugar vulnerable a la sequía. Cuando se redujeron las precipitaciones en los años ochenta del siglo pasado, la violencia no tardó en llegar. La lucha por hacerse con las escasas provisiones de agua y alimentos, o por preservarlas, enfrentó a las distintas comunidades.

Nuestros debates públicos tienden a ignorar los poderosos efectos ecológicos porque nos fijamos sólo en la política.

Los conflictos surgen, sobre todo, cuando la hambruna provocada por la sequía se da en lugares ya empobrecidos que no cuentan con un colchón de recursos físicos o financieros. El conflicto de Darfur también lo desencadenaron las disputas étnicas y políticas, con unos líderes ambiciosos, violentos y sin escrúpulos que explotaron las divisiones étnicas. Esta vulnerabilidad, por supuesto, no es exclusiva de Darfur. Muchos estudios han demostrado que cuando en el Africa subsahariana se produce un descenso temporal de las precipitaciones, la probabilidad de que se desencadene la violencia aumenta en los meses siguientes.

Indudablemente, Africa no es el único lugar donde se pueden relacionar impacto climático e inestabilidad social extrema. Los cambios en las precipitaciones asociados a El Niño han tenido consecuencias catastróficas similares. En 1998, las inundaciones destruyeron en las costas ecuatorianas gran parte de la cosecha de exportación y de la piscicultura. De ahí que abundasen los créditos fallidos. El sistema bancario era ya débil: se provocó un pánico bancario, el país sufrió un colapso económico sin precedentes y el gobierno acabó siendo derribado. Al otro lado del mundo, en Indonesia, El Niño provocó una extrema sequía que coincidió con una crisis financiera generalizada en Asia. La sequía de Indonesia y la falta de alimentos resultante contribuyeron a una desestabilización política y financiera, que terminó con los 31 años de gobierno del presidente Suharto. Como en Ecuador, el colapso económico a corto plazo fue, con diferencia, el más grave en la historia moderna del país.

Los escépticos sobre el cambio climático que no comprenden por qué deben preocuparse "por sólo uno o dos grados" de aumento de la temperatura media mundial, no entienden ni los procesos climáticos, ni los sistemas sociales ni económicos en los que vivimos. Clima y sociedad están sujetos a una gran inestabilidad, a respuestas no lineales, y son muy imprevisibles. Los cambios climáticos pueden influir en las tormentas, en las sequías, en las inundaciones, en el rendimiento de las cosechas, en la propagación de enfermedades, en mucho más de lo que sugieren las predicciones del tiempo habituales. Asimismo, los efectos ecológicos resultantes pueden ser enormes y nefastos, especialmente en sociedades que ya se enfrentan al hambre o la inestabilidad política o financiera. Nuestros debates públicos tienden a ignorar estos poderosos efectos; nos centramos en la política y olvidamos los problemas medioambientales subyacentes.

Cuando reconozcamos que los riesgos ecológicos afectan a nuestro bienestar económico e incluso a nuestra seguridad nacional, nos preocuparemos por buscar planteamientos más prácticos que ayuden a mitigar el daño que nuestra sociedad global provoca en los ecosistemas de la Tierra. Las estrategias que tendremos que aplicar para adaptarnos a este fuerte impacto que se nos avecina y atenuarlo será el tema de los próximos artículos.

Jeffrey Sachs es director del Instituto de la Tierra, de la Universidad de Columbia, y director del Proyecto Milenio de la ONU.

Hervé This

Cardenalización

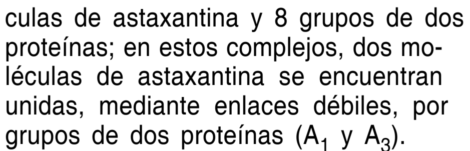
El bogavante que paseaba atado de una cuerda por Gérard de Nerval era azul: estaba vivo. El del teléfono de Salvador Dalí era naranja: estaba cocido. Michèle Cianci y sus compañeros de la Universidad de Manchester han penetrado en el secreto de este cambio de color y han explicado por qué el cangrejo y el bogavante "cardenalizan al cocer", como decía Grimod de la Reynière en el siglo XVIII.

Hace unos veinte años se descubrió que el pigmento rojo del bogavante, la astaxantina, es de color azul en el caparazón del bogavante no cocido porque se halla unido a una proteína. Se suponía que la cocción separaba los dos componentes de este complejo: al quedar libre, el pigmento recuperaba su color rojo natural. Sin embargo, esta hipótesis planteaba otra cuestión: ¿por qué la unión del pigmento con la proteína modificaba la absorción de la luz? Los químicos han aclarado por fin este interrogante. Extrajeron el complejo proteína-pigmento y analizaron por difracción de rayos X las interacciones entre los dos componentes.

La astaxantina del caparazón de los bogavantes corresponde a un carotenoide: un pariente de los carotenos que confieren color naranja a las zanahorias y rojo a los tomates. En el centro de la molécula se encuentra una larga cadena de átomos de carbono con enlaces simples y enlaces dobles alternados. Por ello los electrones de los dobles enlaces son electrones "conjugados": en vez de hallarse localizados entre dos átomos de carbono concretos de la cadena se reparten a lo largo de la misma. Al estar menos ligados a los átomos de carbono, dichos electrones absorben fotones de baja energía (longitud de onda larga), es decir, luz roja.

Entonces, ¿por qué la unión de la astaxantina con una proteína no tiene el efecto inverso, es decir, cambiar el azul a verde o a amarillo? De hecho, se sabe que los anillos de seis átomos de carbono que ocupan los extremos de la cadena modifican la absorción luminosa de los electrones conjugados: cuando dichos anillos y la cadena central se sitúan en el mismo plano, los electrones compartidos se mueven con mayor libertad. La astaxantina está unida a una proteína que se ve perturbada por la cocción. ¿Acaso en los caparazones se produce este efecto y se modifica la alineación de la cadena de carbonos generando un cambio de color? Se trata de cuestiones de sumo interés, pues la absorción luminosa de la astaxantina unida a una proteína guarda semejanza con la del retinal, que interviene en la visión humana.

En los últimos decenios, varios estudios han ido resolviendo el enigma. Se descubrió primero que los compuestos que pigmentaban el caparazón de los bogavantes, las "crustacianinas", contenían unas 16 moléculas de astaxantina y 8 grupos de dos proteínas; en estos complejos, dos moléculas de astaxantina se encuentran unidas, mediante enlaces débiles, por grupos de dos proteínas (A_1 y A_3).

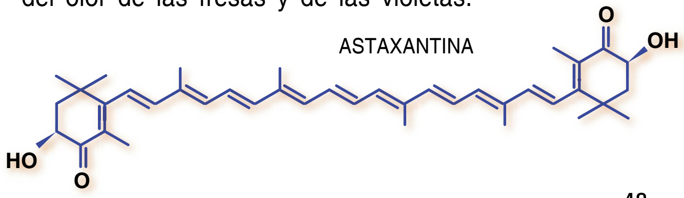


Para conocer la capacidad de movimiento de los electrones en este tipo de estructura no bastan el planteamiento y la resolución de una ecuación. Primero, es necesario determinar la geometría del complejo. Los químicos de Manchester trituraron caparazones, disolvieron los compuestos de crustacianina y, por fin, de las soluciones obtenidas, recuperaron los complejos de crustacianina. Después de las inevitables purificaciones, obtuvieron cristales del complejo puro: cuatro meses de labor paciente para conseguir unos cristales azules que medían menos de medio milímetro de lado. Su obstinación se vio recompensada: pudieron llevar a cabo los estudios cristalográficos con rayos X y revelar la geometría del complejo, que es la que explica su color.

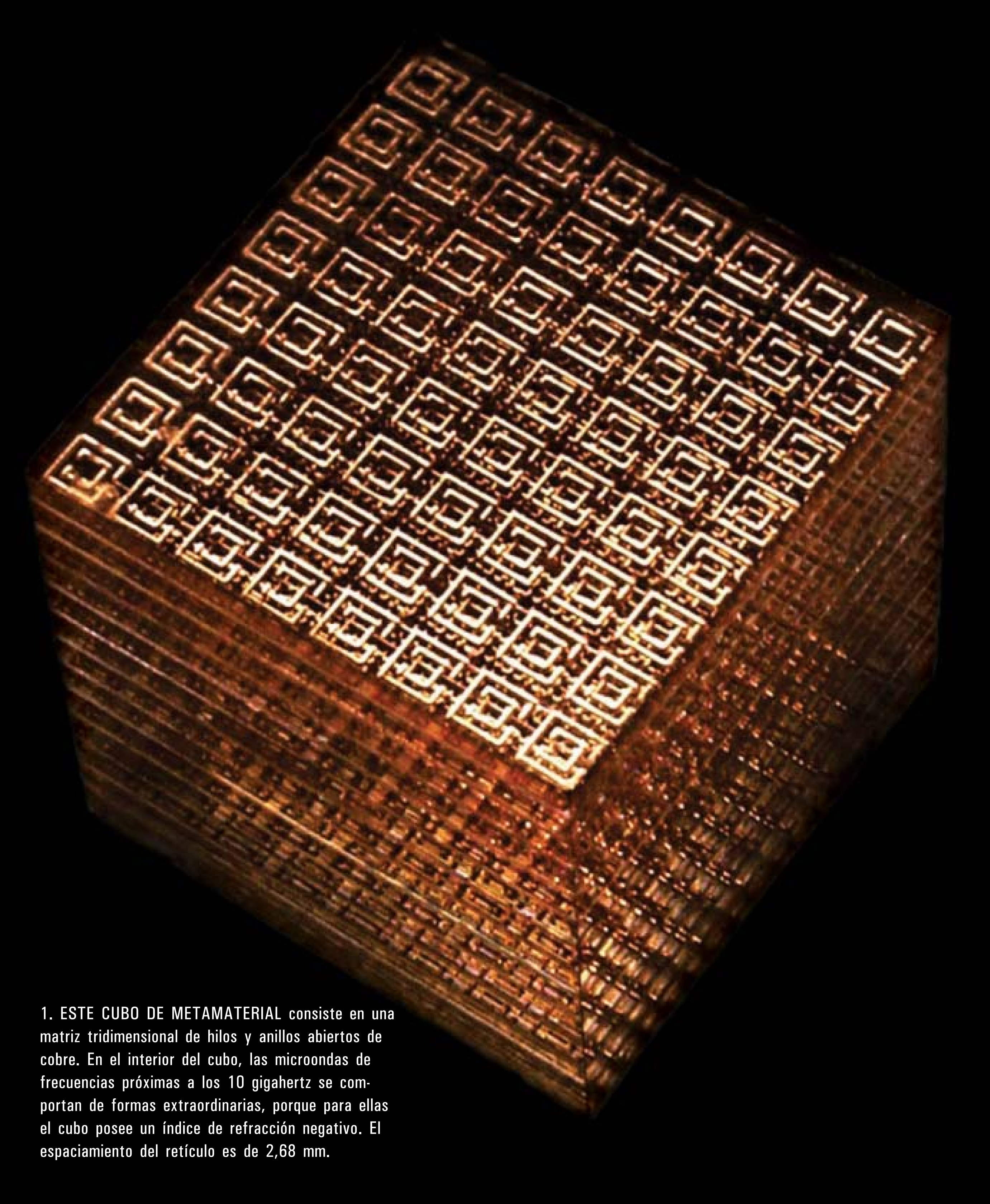
El cambio de color de los bogavantes deriva de varias alteraciones de las moléculas de astaxantina. En primer lugar, la alineación de los anillos terminales con la cadena central aumenta la libertad de los electrones de los enlaces dobles. En la cocción, la desnaturalización de las proteínas altera los complejos y provoca la pérdida de alineación entre los extremos de la astaxantina, lo que modifica la absorción de la luz. Asimismo, se liberan moléculas de agua que interaccionan con los extremos de la molécula de astaxantina; en esta deshidratación se produce el cambio de color.

Colorantes modulables

¿Para qué sirven todos estos estudios? Primero, para comprender por qué los bogavantes evitan a sus depredadores a pesar de contar con un pigmento rojo y, por tanto, detectable. Merced a la unión de la astaxantina con las proteínas, el caparazón toma el color azul oscuro que le asegura un buen camuflaje en las profundidades oceánicas. Por otra parte, estos estudios abren nuevas vías a los ingenieros de la industria alimentaria. Remedando los mecanismos identificados en los caparazones de los bogavantes podrán fabricar colorantes alimentarios variados: podrán divertirse formando complejos de moléculas de astaxantina con proteínas. Obtendrán así colorantes naturales y, por tanto, más apreciados por los consumidores que los colorantes sintéticos. Por fin, el cocinero sabrá que el salteado de caparazones triturados aporta proteínas, cuya cocción libera potentes aromas y carotenoides, que al calentarse suelen generar moléculas aromáticas como la beta-ionona, responsable, en parte, del olor de las fresas y de las violetas.



Superlentes



1. ESTE CUBO DE METAMATERIAL consiste en una matriz tridimensional de hilos y anillos abiertos de cobre. En el interior del cubo, las microondas de frecuencias próximas a los 10 gigahertz se comportan de formas extraordinarias, porque para ellas el cubo posee un índice de refracción negativo. El espaciamiento del retículo es de 2,68 mm.

y supermateriales

Una superlente, construida con "metamateriales" de propiedades ópticas sorprendentes y controvertidas, produciría imágenes con una resolución mejor que la longitud de onda de la luz con que se las tomase

John B. Pendry y David R. Smith

Hace casi 40 años, el científico ruso Victor Veselago conjeturó la existencia de un material que volvería del revés el mundo de la óptica. Haría que las ondas lumínicas parecieran propagarse *hacia atrás* y se comportaran de una forma contraintuitiva. Las lentes construidas con él serían de un tipo completamente nuevo, poseerían cualidades casi mágicas y sus prestaciones superarían con mucho a las de todas las lentes conocidas. Sólo había un contratiempo: ese material habría de tener un índice de refracción negativo (la "refracción" es el cambio de la dirección de propagación al pasar de un medio a otro; el índice expresa la magnitud de la desviación). Ahora bien, todos los materiales conocidos tenían índices de refracción positivos. Veselago, a pesar de años de búsqueda, no consiguió encontrar nada que poseyera las propiedades electromagnéticas necesarias; su conjetura fue cayendo en el olvido.

Un asombroso adelanto científico ha resucitado la idea de Veselago. Las propiedades electromagnéticas de casi todos los materiales derivan de las características de los átomos y moléculas que los integran. Dado que estos constituyentes poseen sólo una limitada gama de características, los millones de materiales de los que se tiene conocimiento exhiben un repertorio bastante pobre de propiedades electromagnéticas. Pero hará unos diez años, uno de los autores (Pendry), en colaboración con científicos de la compañía inglesa Marconi Materials Technology, reparó en que un "material" no tenía por qué ser una mera tableta de sustancia. Podía, por el contrario, adquirir sus propiedades electromagnéticas a partir de estructuras diminutas que creasen, colectivamente, efectos que de otro modo serían imposibles.

El equipo de Marconi emprendió la obtención de estos "metamateriales" y demostró que algunos de ellos dispersaban las ondas electromagnéticas de una suerte tal, que en nada se parecía a las conocidas en los materiales ordinarios. Y en el año 2000, el otro autor de este artículo (Smith), con sus colaboradores de la Universidad de California en San Diego, acertó con una combinación de metamateriales que proporcionaba la escurridiza refracción negativa.

La luz, en los materiales negativo-refringentes, presenta comportamientos tan extraños e insospechados, que los teóricos se han visto poco menos que obligados a redactar de nuevo el manual del electromagnetismo. Mientras, no han faltado acalorados debates sobre la existencia misma de dichos materiales. Entre tanto, los experimentadores se esfuerzan en desarrollar nuevos dispositivos que permitan aprovechar las inusitadas propiedades de los metamateriales: por ejemplo, una superlente capaz de enfocar detalles más finos que la longitud de onda utilizada. Así se litografiaría por medio de luz ordinaria microcircuitos a escalas nanométrica o se grabarían muchísimos más datos en los discos ópticos. Mucho es lo que falta para convertir tales visiones en realidades, pero ahora que el sueño de Veselago se ha materializado más allá de toda duda, el progreso será rápido.

MINAS H. TANIELIAN *Boeing Phantom Works*

Refracción negativa

La comprensión del fenómeno de la refracción negativa requiere cierto conocimiento de la interacción entre las ondas electromagnéticas y los materiales por los que se propagan. Cuando una onda electromagnética atraviesa un material, los electrones de los átomos y moléculas que lo componen experimentan fuerzas, y se mueven en consonancia. Este movimiento consume parte de la energía de la onda y afecta, por ende, a su propagación y propiedades. Ajustando la composición química del material resulta posible afinar las características de propagación de una onda y destinarla a una aplicación determinada.

Pero como demuestran los metamateriales, no es la química la única vía para desarrollar materiales que ofrezcan respuestas electromagnéticas interesantes. Podemos también manipularlas mediante la creación de estructuras diminutas, aunque macroscópicas. Tal posibilidad se debe a que la longitud de onda de una onda electromagnética típica —la distancia entre dos crestas consecutivas— es varios órdenes de magnitud mayor que los átomos o moléculas que componen el material. La onda no "ve" moléculas individuales, sino la respuesta colectiva de millones de ellas. En los metamateriales, los elementos configurados regularmente son bastante menores que la longitud de onda y, por ello, la onda electromagnética no los percibe uno a uno.

Las ondas electromagnéticas, como su nombre indica, constan de un campo eléctrico y de un campo magnético. Inducen en los electrones del material sendos movimientos característicos: de vaivén, el campo eléctrico; circular, el campo magnético. La medida en que el material responde a estas excitaciones viene cuantificada por dos parámetros: la permisividad eléctrica ε, que resume la reacción de sus electrones a los campos eléctricos, y la permeabilidad magnética μ, medida de la respuesta de los electrones a los campos magnéticos. Casi todos los materiales presentan valores positivos de ε y de μ.

Otro valor importante que indica el comportamiento óptico del material es su índice de refracción, que se denota n. Este índice de refracción guarda una relación sencilla con ε y μ: $n = \pm\sqrt{\varepsilon\mu}$. En todos los materiales conocidos es forzoso elegir el signo positivo en la raíz cuadrada; por ello, su índice de refracción es positivo. Pero Veselago demostró en 1968 que si ε y μ fuesen ambos negativos, también habría de tomarse para n el signo negativo. Por consiguiente, un material donde ε y μ fuesen negativos sería negativo-refringente.

Decir que ε o μ tienen valor negativo supone que los electrones del material se mueven en sentido contrario a las fuerzas que les imparten los campos eléctrico y magnético. Tal comportamiento podría parecer paradójico; sin embargo, resulta sencillo lograr que los electrones se opongan al "empuje" de los campos eléctrico y magnético que se les apliquen.

Pensemos en un columpio. Si le aplicamos un empuje lento y constante, se desplazará en la dirección del empuje, si bien se elevará poco. Una vez en movimiento, tenderá a oscilar adelante y atrás, con un ritmo característico, su frecuencia de resonancia. Si lo impulsamos periódicamente en sincronía con esa oscilación, irá trazando arcos cada vez más amplios. Probemos ahora a impulsarlo con un ritmo más rápido; el empuje se desfasará con respecto a la oscilación del columpio: llegará un momento en que, para empujarlo, habremos de extender los brazos por completo, con el columpio avanzando hacia nosotros. Si llevamos un ratito impulsándolo, es posible que el columpio haya adquirido una cantidad de movimiento suficiente para derribarnos: es el columpio el que nos empuja a nosotros. De igual manera, los electrones de un material con índice de refracción negativo se desfasan y resisten el "empujón" del campo electromagnético.

Metamateriales

La resonancia, es decir, la tendencia a oscilar a una frecuencia determinada, encierra la clave para lograr esta clase de respuesta negativa. Se introduce artificialmente en un metamaterial mediante la construcción de diminutos circuitos proyectados para remedar la respuesta magnética o eléctrica de un material. En un resonador de anillo abierto, por ejemplo, un flujo magnético penetra en los anillos metálicos que lo componen e induce en ellos corrientes giratorias, análogas a las del magnetismo en los materiales (*véase el recuadro* "Inducción de una respuesta"). En cambio, en un retículo de hilos metálicos rectilíneos un campo eléctrico alterno induce corrientes de sentido oscilante.

Si se permite que actúen libremente, los electrones de estos circuitos vibrarán en vaivén a la frecuencia de resonancia natural, determinada por la estructura y dimensión de los circuitos. Si se aplica un campo de frecuencia menor que la de resonancia natural, la respuesta que se obtiene es la positiva normal. Sin embargo, justo un poco por encima de la frecuencia de resonancia, la respuesta será negativa, lo mismo que el columpio que empuja en sentido contrario cuando es impulsado con una frecuencia mayor que la suya propia. Los hilos pueden por ello proporcionar respuestas con ε negativa en un cierto intervalo de frecuencias, mientras que los anillos abiertos darían una respuesta magnética con μ negativa en esa misma banda de frecuencias. Estos hilos y anillos abiertos son, precisamente, los bloques constructivos necesarios para crear un amplio repertorio de in-

Resumen/Metamateriales

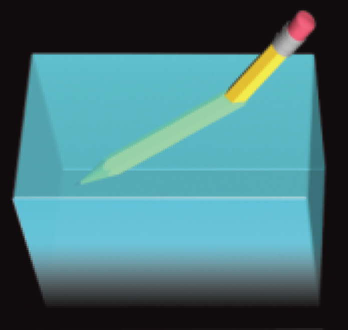
- Con estructuras microscópicas de características oportunas se pueden crear materiales que poseen propiedades electromagnéticas muy diferentes de las observadas en las sustancias naturales. En particular, estos "metamateriales" presentan un índice de refracción negativo.
- Una tableta de material negativo-refringente actuaría como una superlente que superaría a cualquier lente conocida, que tienen índice de refracción positivo. Una superlente crearía imágenes con una resolución mayor que la consentida por el límite de difracción, que constriñe las prestaciones de todos los sistemas con índice de refracción positivo.
- Aunque casi todos los experimentos en que intervienen metamateriales se realizan con microondas, en el futuro quizá se lleguen a utilizar longitudes de onda infrarrojas o de luz visible.

EL MISTERIO DE LA REFRACCION NEGATIVA

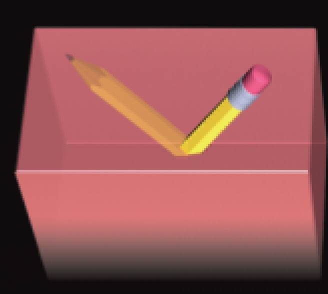
En un medio con índice de refracción negativo, el comportamiento de la luz (y de cualquier otra radiación electromagnética) difiere del que muestra en los materiales ordinarios de índice de refracción positivo, tanto, que desafía a la intuición.

MEDIO POSITIVO-REFRINGENTE

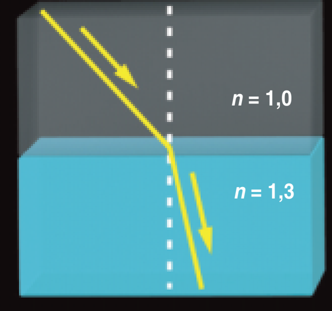
MEDIO NEGATIVO-REFRINGENTE



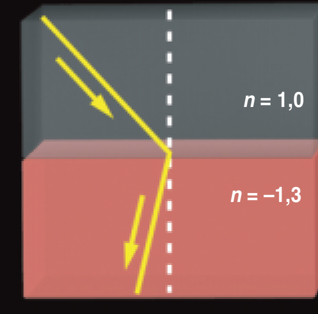
Un lápiz introducido a medias en agua parece doblarse, debido a que el agua tiene mayor índice de refracción.



Un lápiz introducido en un medio de índice de refracción negativo parecería doblarse hacia el exterior y quedar completamente fuera del medio.



Cuando la luz viaja desde un medio con índice de refracción (n) menor hasta otro con índice de refracción mayor, se desvía hacia la normal (*línea de puntos que forma ángulo recto con la superficie*).



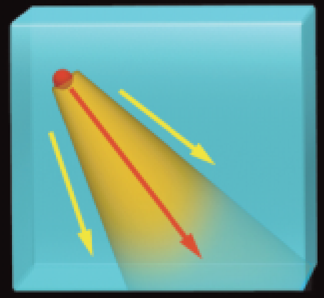
Cuando la luz viaja desde un medio positivo-refringente a otro con índice de refracción negativo, se desvía hacia el mismo lado de la normal por el que llegó.



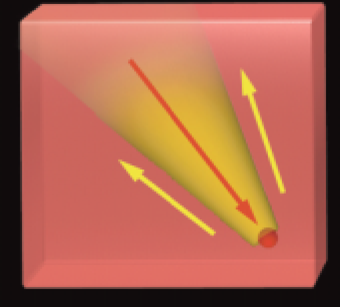
Un objeto que se aleja se torna rojizo debido al efecto Doppler.



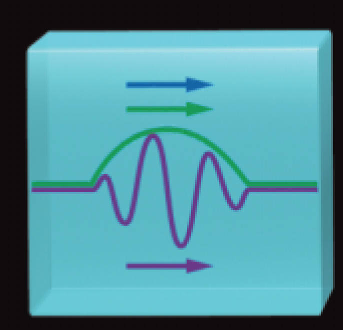
Un objeto que se aleja se torna azulado.



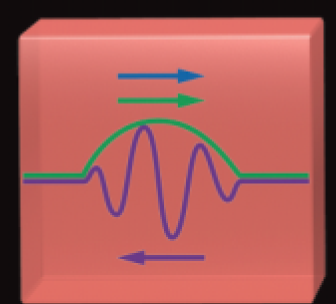
Un objeto cargado (*en rojo*) que viaja más rápidamente que la luz en el medio genera un cono de radiación de Cherenkov (*en amarillo*) que se abre en el sentido de la marcha.



El cono de Cherenkov se abre hacia atrás.



Todas las crestas de un impulso electromagnético (*en violeta*) viajan en la misma dirección que la envolvente del grupo (*en verde*) y que la energía (*en azul*).



Las crestas individuales viajan en sentido contrario al de la envolvente del impulso y al de la energía.

MELISSA THOMAS

teresantes metamateriales, entre ellos el que Veselago había buscado tan denodadamente.

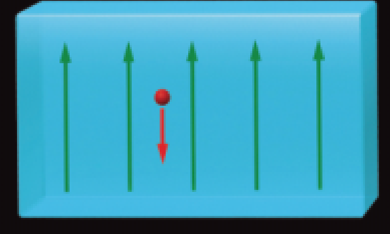
Las primeras pruebas experimentales de la posibilidad de construir materiales con índice de refracción negativo se obtuvieron en experimentos realizados por el grupo de la Universidad de California en San Diego en 2000. La condición más estricta que ha de cumplir un metamaterial es que sus elementos sean mucho menores que la longitud de onda incidente. Por eso, el grupo utilizó microondas de una longitud de varios centímetros. Permitía que los elementos del metamaterial tuvieran dimensiones de pocos milímetros: una escala oportuna.

El equipo diseñó un metamaterial que entrelazaba hilos y resonadores anulares en una formación prismática. Los hilos proporcionaban una ε negativa; los anillos, una μ negativa. Acoplarlos, razonó el equipo, debería proporcionar un índice de refracción negativo. Se preparó también un prisma de teflón de las mismas dimensiones que el prototipo, que serviría de referencia. El teflón presenta un índice de refracción $n = 1,4$. Los investigadores dirigieron un haz de microondas sobre una cara del prisma y detectaron la cantidad de microondas que emergían del mismo en distintos ángulos. De acuerdo con lo esperado, el haz de microondas experimentó una refracción positiva en el prisma de teflón; en el prisma de metamaterial, en cambio, se refractó negativamente. La especulación de Veselago se había hecho realidad. Se había conseguido un material con índice de refracción negativo. ¿O no?

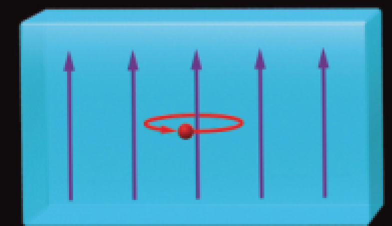
INDUCCION DE UNA RESPUESTA

La clave para producir un metamaterial consiste en crear una respuesta artificial a las solicitaciones de los campos eléctrico y magnético.

EN UN MATERIAL ORDINARIO

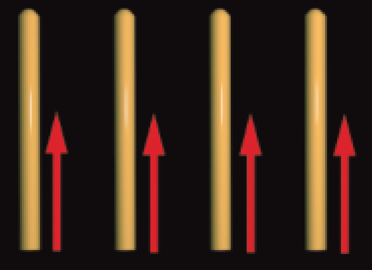


Un campo eléctrico (*en verde*) induce un desplazamiento lineal en los electrones (*en rojo*).



Un campo magnético (*en violeta*) induce en los electrones un movimiento circular.

EN UN METAMATERIAL



Fluyen corrientes lineales (*flechas rojas*) por una matriz de hilos.



Fluyen corrientes circulares en resonadores de anillo abierto.

ESTRUCTURA DE UN METAMATERIAL





Para preparar un metamaterial se crea una matriz de hilos y resonadores que sean mucho menores que la longitud de las ondas electromagnéticas que se le van a aplicar al material.

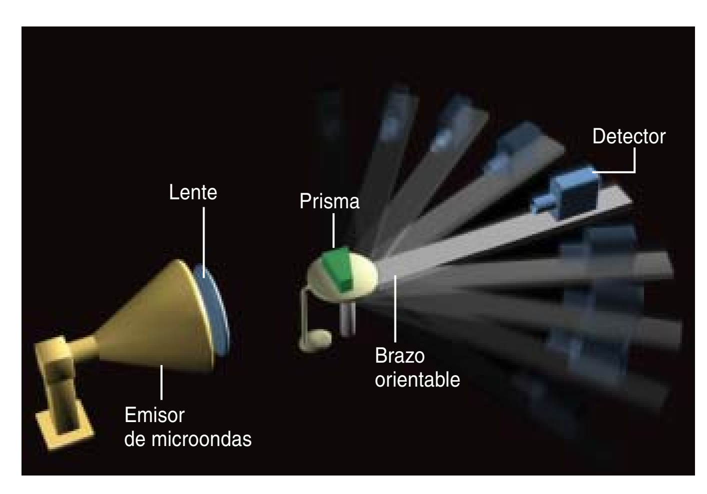
MELISSA THOMAS

Pero, ¿de verdad funciona?

Los experimentos de la Universidad de California en San Diego, sumados a las nuevas y notables predicciones sobre los materiales con índice de refringencia negativo, suscitaron una oleada de interés en otros investigadores. Debido a que en tiempos de la hipótesis de Veselago no se conocía ningún metamaterial, no se había prestado especial atención a la idea de la refracción negativa. Pero ahora, abierta la posibilidad de crear metamateriales para verificar las extravagantes consecuencias que entrañaba, se le concedió mayor interés. Los escépticos empezaron a preguntarse si los materiales negativo-refringentes no supondrían una infracción de las leyes fundamentales de la física. De ser así, todo el programa de investigación quedaría invalidado.

Una de las discusiones más encendidas se centró en la noción de velocidad de una onda en un material complicado. La luz viaja en el vacío a su velocidad máxima, 300.000 kilómetros por segundo. Esta velocidad se representa por el símbolo c. La velocidad de la luz en un medio material, sin embargo, es más reducida; en concreto, $v = c/n$, siendo n el índice de refracción del material. Ahora bien, ¿qué ocurre si n es negativo? La interpretación más sencilla de la fórmula sugiere que la luz se propaga hacia atrás.

Una respuesta más completa tiene en cuenta que en las ondas se han de considerar dos velocidades, la de fase y la de grupo. Imaginemos que un impulso luminoso viaja a través de un medio. Este impulso se parecería al que vemos en la última ilustración



2. UN EXPERIMENTO REALIZADO en Boeing Phantom Works, de Seattle, en el que se utilizaron un prisma de metamaterial y un prisma de teflón (que tiene índice de refracción positivo), confirmó la existencia de la refracción negativa. El teflón refractó las microondas en un ángulo positivo (*línea azul*); el metamaterial lo hizo con un ángulo negativo (*línea roja*).

MELISSA THOMAS (*izquierda*); MELISSA THOMAS; FUENTE: MINAS H. TANIELIAN *Boeing Phantom Works* (*derecha*)

del recuadro “El misterio de la refracción negativa”: las crestas de la onda irían creciendo hasta alcanzar un máximo en el centro del impulso y luego se amortiguarían y extinguirían de nuevo. La velocidad de fase es la velocidad con que se desplazan las crestas, individualmente. La velocidad de grupo es la velocidad con la que viaja la envoltura o perfil del impulso. Estas dos velocidades no tienen por qué ser iguales.

En un material con índice de refracción negativo, tal como Veselago había descubierto, las velocidades de fase y de grupo tienen sentidos opuestos. Sorprendentemente, las crestas individuales del impulso viajan hacia atrás, a pesar de que el perfil del impulso se desplaza hacia adelante. Este hecho tiene también consecuencias asombrosas para un haz continuo de luz, como el procedente del foco de una linterna enteramente inmersa en un material de índice negativo. Si pudiésemos observar las crestas individuales de la onda luminosa, las veríamos emerger de la diana del haz y remontarlo para acabar desapareciendo en el foco, como si estuviésemos viendo una película en retroceso. No obstante, la energía del haz luminoso viajaría hacia adelante, alejándose del foco, exactamente como se espera. Esa es la dirección en la que realmente viaja el haz, a pesar de la asombrosa retrogradación de las crestas.

No es fácil en la práctica estudiar cresta a cresta. El detalle de un impulso o destello puede resultar bastante complicado. No obstante, existe un hábil recurso para abordar la diferencia entre las velocidades de grupo y de fase. Cuando se suman dos ondas de distinta longitud de onda que viajan en la misma dirección, las ondas se interfieren y generan un patrón rítmico que se desplaza a la velocidad de grupo.

Prashant H. Valanju y sus colaboradores de la Universidad de Texas en Austin aplicaron esta idea al experimento de refracción de la Universidad de California en San Diego. Observaron algo curioso: cuando dos ondas de distinta longitud se refractan en la interfaz de dos materiales, uno de índice de refracción positivo, el otro de índice negativo, sus correspondientes ángulos de refracción se diferencian levemente. El patrón rítmico resultante, en vez de seguir a los haces negativamente refractados, parece que exhibe refracción positiva. Al identificar este patrón rítmico con la velocidad de grupo, los investigadores de Texas concluyeron que cualquier onda físicamente realizable experimentaría refracción positiva: tal vez pueda existir un material con índice de refracción negativo, pero la refracción negativa es imposible.

Suponiendo que los descubrimientos de los físicos de Texas son correctos, ¿cómo se explican los resultados de los experimentos de San Diego? Valanju y muchos otros investigadores han atribuido la aparente refracción negativa a diversidad de fenómenos. ¿Cabría que la muestra de San Diego absorbiese tanta energía, que las ondas sólo pudiesen escapar por el costado estrecho del prisma, disfrazadas de ondas negativamente refractadas? Al fin y al cabo, en la muestra de San Diego existía una absorción importante y la medición se efectuó a no mucha distancia de la cara del prisma. La teoría de absorción resultaba verosímil.

Estas conclusiones fueron causa de gran preocupación, pues no sólo podían invalidar los experimentos de San Diego, sino también todos los fenómenos pronosticados por Veselago. No obstante, tras reflexionar sobre la cuestión, nos dimos cuenta de que era erróneo basarse en el patrón rítmico para determinar la velocidad de grupo. Llegamos a la conclusión de que en el caso de dos ondas que viajan en direcciones opuestas, el patrón de interferencia resultante se desliga de la velocidad de grupo.

Al mismo tiempo que se desmoronaban los argumentos de los críticos, empezaron a llegar nuevas confirmaciones experimentales de la refracción negativa. El grupo de Minas Tanielian, de Boeing Phantom Works, en Seattle, repitió el experimento de San Diego con un prisma de metamaterial de muy baja absorción. El equipo de Boeing situó, además, el detector a una distancia mucho mayor del prisma, lo que permitía descartar la absorción en el metamaterial como causa del haz negativamente refractado. La ejemplar calidad de los datos del grupo de Boeing y de otros acabó por disipar todas las dudas que quedaban sobre la existencia de la refracción negativa. Ahora teníamos libertad para seguir avanzando y sacar provecho de la idea, aunque con la cautela que impone la sutileza de los fenómenos relacionados con estos nuevos materiales.

Más allá de Veselago

Una vez dispersado el humo de la batalla, empezamos a percatarnos de que Veselago no nos había enseñado la última palabra sobre el comportamiento de la luz en materiales con índice de refracción negativo. Uno de los útiles más importantes de que se valió Veselago era el rastreo de rayos, proceso consistente en ir trazando líneas que describen la trayectoria que seguiría un rayo de luz; se tienen así en cuenta la reflexión y la refracción en las interfaces de materiales distintos.

El rastreo de rayos constituye una técnica poderosa, que nos ayuda a comprender, por ejemplo, que los objetos sumergidos en una piscina parezcan hallarse más cerca de la superficie de lo que realmente están y que a un lápiz sumergido a medias se le vea doblado. Ambos efectos se deben a que el índice de refracción del agua (en torno a 1,3) es mayor que el del aire: los rayos de luz se tuercen por eso en la interfaz entre el aire y el agua; el índice de refracción es aproximadamente igual al cociente de la profundidad real y la profundidad aparente.

Según el rastreo de rayos, quien nadase en una piscina con índice de refracción negativo parecería flotar sobre la superficie. También el contenido completo de la piscina —y el propio vaso de la piscina— parecerían encontrarse sobre la superficie.

Veselago se valió del rastreo de rayos para pronosticar que una pieza de material negativo-refringente que tuviera índice $n = -1$ debería actuar como una lente dotada de propiedades inéditas. Nos son familiares las lentes de índice de refracción positivo de las lupas, gafas, microscopios, telescopios y cámaras fotográficas. Las caracteriza su distancia focal. El punto de formación de la imagen depende a la vez de la distancia focal y de la distancia que exista entre la lente y el objeto. Lo normal es que difieran los tamaños de la imagen y del objeto, y que las lentes ofrezcan mejores resultados cuando los objetos se encuentren situados sobre su eje. La lente de Veselago funciona de muy distinto modo (*véase el recuadro* "La superlente"): más sencilla, actúa sobre objetos contiguos a ella y transfiere la totalidad del campo óptico de uno a otro lado de la lente.

Tan insólita es la lente de Veselago, que Pendry se sintió obligado a preguntarse con qué grado de perfección se podría hacer que funcionara. En concreto, ¿cuál sería la resolución última de la lente de Veselago?

El límite impuesto por la difracción constriñe a los elementos ópticos de índice positivo a no resolver más que los detalles del mismo tamaño, o mayores, que la longitud de onda de la luz reflejada por el objeto. La difracción impone el límite último en todos los sistemas de obtención de imágenes, se trate del más pequeño objeto observable con un microscopio o la mínima distancia entre estrellas que distinguirá un telescopio.

La difracción determina también el tamaño mínimo de los componentes que la litografía óptica construirá en un microcircuito. De forma parecida, impone también un límite a la cantidad de información que se puede almacenar o recuperar por medios ópticos en un disco de vídeo digital (DVD). Un método que eludiese los límites impuestos por la difracción revolucionaría las técnicas ópticas y permitiría una litografía nanométrica y, posiblemente, el almacenamiento en discos ópticos de conjuntos de datos cientos de veces mayores.

Para determinar si la óptica de índice de refracción negativo podría o no superar a la versión positiva era necesario ir más allá del rastreo de rayos, que no tiene en cuenta la difracción y, por consiguiente, no vale para pronosticar el comportamiento de las lentes de índice de refracción negativo. Para dar cabida a la difracción teníamos que utilizar una descripción más precisa del campo electromagnético.

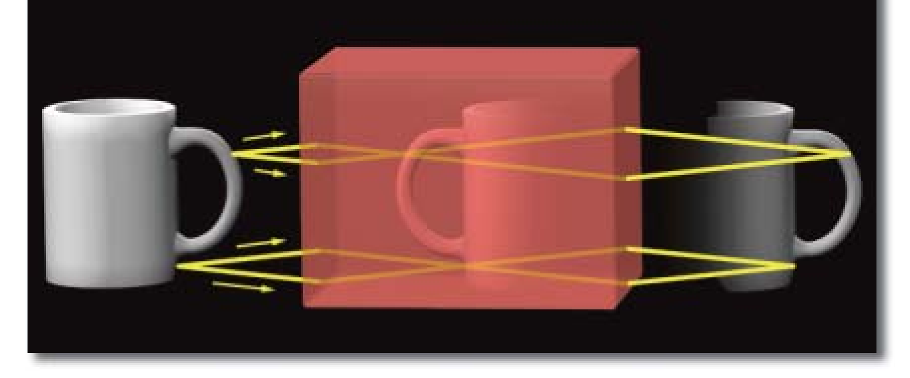
La superlente

En una descripción más precisa, todas las fuentes de ondas electromagnéticas, ya sean átomos radiantes, antenas de radio o un haz de luz que emerge de una abertura angosta, producen dos tipos de campos: el campo distante y el campo próximo. Como su nombre indica, el campo distante es la parte que se radia lejos de un objeto y puede ser captada por una lente para formar una imagen. Desafortunadamente, sólo contiene una descripción burda del objeto, como si lo pintase a brochazos, con una resolución limitada por la longitud de onda de la radiación. El campo próximo, en cambio, contiene en su totalidad los más finos detalles, pero su intensidad decae muy deprisa con la distancia. Las lentes de índice positivo no tienen posibilidad alguna de captar el campo cercano, sumamente débil, y trasladarlo hasta la imagen. No acontece igual en las lentes de índice negativo.

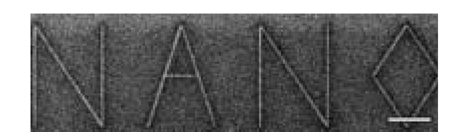
Al examinar de qué forma interactuaban los campos próximo y lejano en el seno de una lente de Veselago, Pendry llegó en el año 2000, para general sorpresa, a la conclusión de que la lente podría, al menos en teoría,

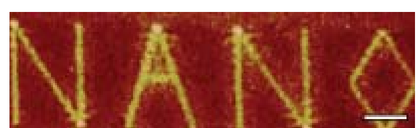
LA SUPERLENTE

Una tableta de material negativo-refringente forma una superlente. La luz (*rectas amarillas*) procedente de un objeto (*a la izquierda*) se refracta en la superficie de la lente y se enfoca en el interior de la lente, donde forma una imagen invertida. Al salir de la pieza, la luz vuelve a refractarse, produciendo una segunda imagen (*a la derecha*). En el caso de algunos metamateriales, la imagen llega incluso a presentar detalles más finos que la longitud de onda de la luz utilizada, cosa imposible con lentes de índice de refracción positivo.



MELISSA THOMAS







3. UNA FINA PELICULA DE PLATA actúa a modo de superlente a distancias muy pequeñas. La imagen de la palabra "NANO" se ha tomado con un haz iónico enfocado (*a la izquierda*), con medios ópticos sin superlente (*centro*) y con una superlente de plata (*derecha*) de 35 nanómetros de espesor. La barra de referencia mide 2000 nanómetros. Con la superlente la resolución es más fina que la longitud de onda de la luz utilizada, de 365 nanómetros.

XIANG ZHANG *Universidad de California, Berkeley*

reenfocar tanto los campos distantes como los cercanos. Si esta asombrosa conclusión fuese verdadera, significaría que la lente de Veselago no estaba sometida a los límites que la difracción impone a toda óptica conocida hasta hoy. La tableta plana de índice de refracción negativo ha recibido por ello el nombre de superlente.

En un análisis posterior, otros investigadores y nosotros mismos hemos apreciado que la resolución de la superlente está limitada por la calidad del material negativo-refringente. Para alcanzar un rendimiento óptimo no sólo es necesario que el índice de refracción n sea igual a –1, sino que también $\varepsilon = -1$ y $\mu = -1$. La resolución de una lente que no se aproximase a este ideal sufriría una drástica reducción. El cumplimiento simultáneo de ambas condiciones supone una gran dificultad. Pero en 2004, Anthony Grbic y George V. Eleftheriades, de la Universidad de Toronto, demostraron experimentalmente que un metamaterial diseñado para cumplir $\varepsilon = -1$ y $\mu = -1$ en radiofrecuencias resolvía los objetos a una escala menor que la impuesta por el límite de difracción. Es posible, pues, construir una superlente. Ahora bien, ¿se conseguiría para las longitudes de onda ópticas, que son mucho menores?

El problema de lograr metamateriales aptos para longitudes de onda ópticas es doble. En primer lugar, habría que reducir a escala nanométrica los elementos metálicos conductores que componen los microcircuitos del metamaterial, los hilos y los anillos abiertos, para que fuesen mucho menores que la longitud de onda de la luz visible (comprendida entre 400 y 700 nanómetros). En segundo, cuanto menor es la longitud de onda, más elevada es la frecuencia; a frecuencias altas, los metales cada vez conducen peor y, por lo tanto, las resonancias en que se fundan los metamateriales se amortiguan. En 2005, Costas Soukoulis, de la Universidad estatal de Iowa, y Martin Wegener, de la Universidad de Karlsruhe, demostraron experimentalmente la posibilidad de fabricar resonadores de anillo abierto que funcionan a longitudes de onda de sólo 1500 nanómetros. La resonancia magnética, aunque débil a esas frecuencias, nos permite formar metamateriales de interés.

No podemos todavía fabricar un material que posea $\mu = -1$ a las longitudes de onda de la luz visible. Por fortuna, cabe una solución de compromiso. Cuando la distancia entre el objeto y la imagen es mucho menor que la longitud de onda, basta con cumplir la condición $\varepsilon = -1$ y podemos olvidarnos de μ.

El grupo de Richard Blaikie, de la Universidad de Canterbury en Nueva Zelanda, y el de Xiang Zhang, de la Universidad de California en Berkeley, por separado, siguieron esta vía y demostraron la existencia de superresolución en un sistema óptico. A longitudes de onda ópticas, las resonancias inherentes de un metal pueden llevar a permisividades (ε) negativas. Por consiguiente, una capa muy delgada de metal puede actuar como una superlente a una longitud de onda para la que $\varepsilon = -1$.

Tanto Blaikie como Zhang utilizaron una película de plata de unos 40 nanómetros de espesor para crear una imagen con luz de 365 nanómetros de longitud de onda que emanaba de rendijas cuyo tamaño era menor que la longitud de onda de la luz. Aunque una laminilla de plata dista de ser una lente ideal, la superlente de plata mejoró sustancialmente la resolución de la imagen, llevando así a cabo el principio básico de las superlentes.

Hacia el futuro

La consecución de una superlente es sólo la más reciente de las múltiples predicciones que han de hacerse realidad para los materiales negativo-refringentes, lo que da una idea de los rápidos avances que se están produciendo en este campo emergente. La refracción negativa ha llevado a que se reexamine de arriba abajo el electromagnetismo. Aunque se creía que no quedaba ninguna laguna en nuestro conocimiento del mismo, algunos fenómenos ópticos fundamentales, como la difracción y el límite difractivo, presentan ahora nuevos matices en el contexto de los materiales negativo-refringentes.

La conversión de la magia de los metamateriales y de los materiales negativo-refringentes en técnicas útiles queda pendiente. Entrañará el perfeccionamiento del diseño de los metamateriales y su fabricación a precios competitivos. Los numerosos grupos que se encuentran ahora trabajando en este campo están afrontando decididamente estos retos.

Los autores

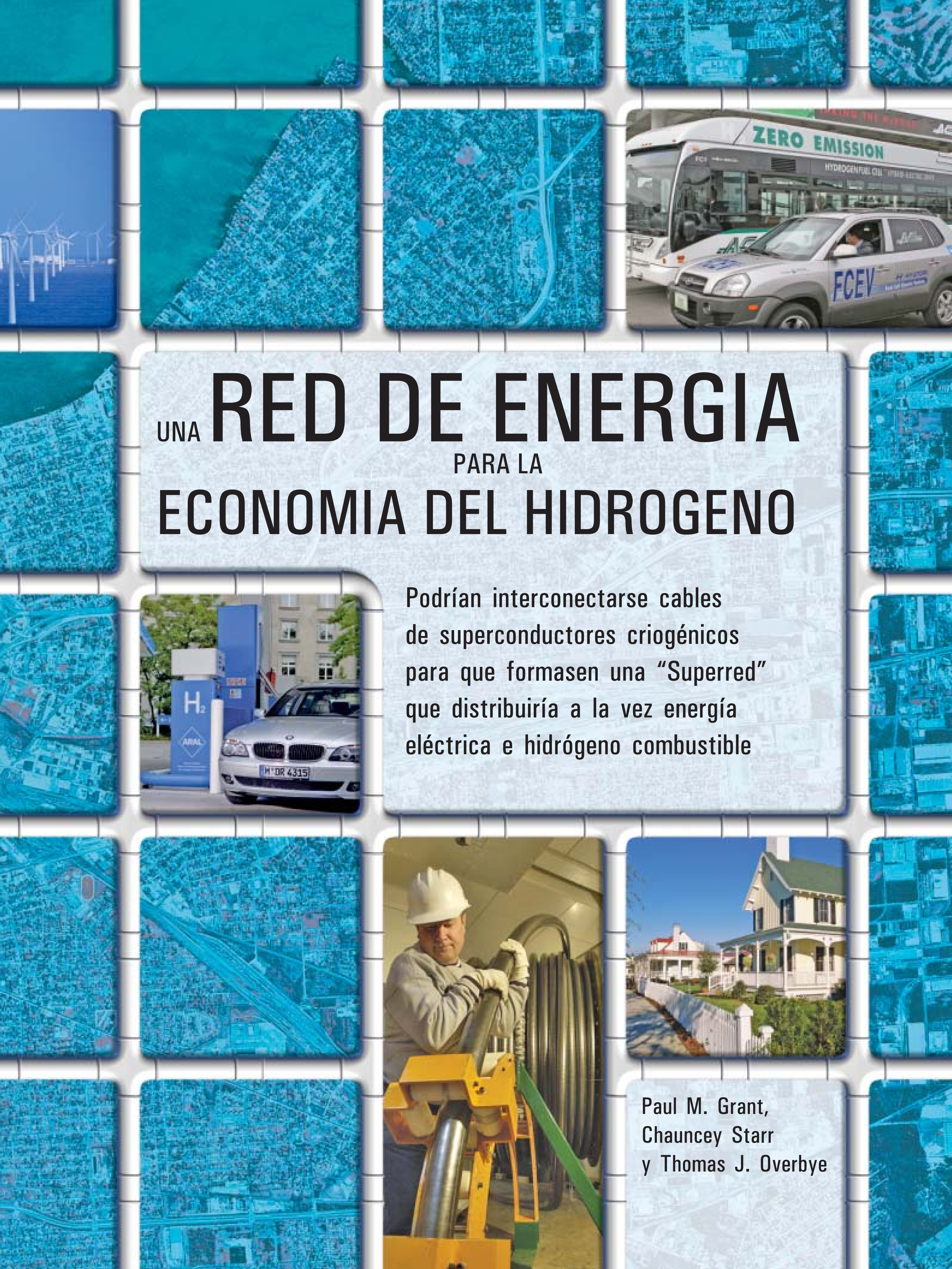
John B. Pendry y **David R. Smith** son miembros del equipo de investigadores que compartió en 2005 el premio Descartes a la investigación por sus contribuciones a los metamateriales. Han colaborado en su desarrollo desde el año 2000, centrándose Pendry en los aspectos teóricos y Smith en los experimentales. Pendry es profesor de física del Colegio Imperial de Londres. Smith enseña ingeniería eléctrica e informática en la Universidad Duke.

Bibliografía complementaria

REVERSING LIGHT WITH NEGATIVE REFRACTION. John B. Pendry y David R. Smith en *Physics Today*, vol. 57, n.º 6, págs. 37-43; junio de 2004.

NEGATIVE-REFRACTION METAMATERIALS: FUNDAMENTAL PRINCIPLES AND APPLICATIONS. G. V. Eleftheriades y K. Balmain. Wiley-IEEE Press, 2005.


首批国产



UNA RED DE ENERGIA PARA LA ECONOMIA DEL HIDROGENO

Podrían interconectarse cables de superconductores criogénicos para que formasen una "Superred" que distribuiría a la vez energía eléctrica e hidrógeno combustible

Paul M. Grant,
Chauncey Starr
y Thomas J. Overbye

En la tarde del 14 de agosto de 2003, la ciudad de Nueva York se quedó sin luz. Los 10 millones de habitantes de la Gran Manzana —además de otros 40 millones del nordeste de EE.UU. y Ontario— vivieron una tensa noche de oscuridad. Las sobrecargas producidas por el fallo de una central eléctrica en Ontario habían sobrecalentado unas líneas de alta tensión; al tocar con los árboles, se cortocircuitaron. Los fallos se propagaron en cascada, como fichas de dominó, por toda la red eléctrica: cayeron 265 centrales, que dejaron a oscuras 24.000 kilómetros cuadrados.

Aquel incidente, así como el apagón aún más extenso que un mes más tarde afectó a 56 millones de personas en Italia y Suiza, hizo reparar en los problemas que crean las redes eléctricas interconectadas, en la civilización moderna equivalentes al sistema circulatorio biológico. En Norteamérica la red de suministro eléctrico ha evolucionado palmo a palmo en los cien últimos años. Hoy es una infraestructura de más de un billón de dólares, que cubre todo el continente con millones de kilómetros de hilos a tensiones de hasta 765.000 volt. Pese a su importancia, ninguna organización tiene control sobre el funcionamiento, la conservación o la protección de la red, fenómeno que se repite también en Europa. Docenas de compañías deben cooperar, aun cuando compitan por generar y distribuir, a cada segundo, exactamente la potencia que demandan los clientes: ni más ni menos. Los apagones de 2003 levantaron un clamor unánime por un control más estricto del gobierno y espolearon a las compañías a proceder con mayor presteza, a través de su Consorcio IntelliGrid y del programa GridWise (red inteligente) del Departamento de Energía de EE.UU., a crear en la red sistemas capaces de autorrepararse e impedir la propagación en cascada de ciertos tipos de cortes de suministro. Pero la fiabilidad no es el único reto —ni siquiera el más importante— que afrontará la red en las próximas décadas.

Una limitación más fundamental de la red del siglo XX se esconde en su mala preparación ante dos tendencias del siglo actual: el incesante crecimiento de la demanda de energía eléctrica y la transición, ya iniciada, desde las centrales y vehículos alimentados por combustibles fósiles hasta la electricidad y los combustibles de automoción producidos por fuentes más limpias. No pueden las compañías eléctricas aumentar la potencia que transmiten las líneas de alta tensión actuales con el recurso fácil de multiplicar tensiones y corrientes. Al acercarse al millón de volt, los campos eléctricos desgarran el aislamiento de los hilos y provocan descargas en arco y cortocircuitos. A corrientes más elevadas las líneas se calientan y, con ello, se flexionan hasta acercarse peligrosamente a árboles y estructuras.

No está nada claro, además, cómo podría soportar la infraestructura actual una rápida difusión de vehículos híbridos que obtengan parte de su potencia de la electricidad o del hidrógeno. Y como el sistema eléctrico debe guardar un constante equilibrio entre la energía generada y la consumida, parece difícil que acepte un fuerte aumento de la potencia, impredecible e intermitente, producida por fuentes renovables como el viento, el mar y los rayos solares.

Pertenecemos a un grupo de ingenieros y físicos, cada vez más nutrido, que ha empezado a elaborar diseños para un nuevo sistema de suministro de energía al que llamamos "Superred continental". Debería irse desarrollando progresivamente como anejo de la red actual, cuya capacidad y fiabilidad reforzaría. En unas docenas de años, esta Superred establecería los medios necesarios para generar y suministrar no sólo grandes cantidades de electricidad fiable, económica y "limpia", sino también hidrógeno para el almacenamiento de energía y el transporte de personas.

Los análisis de ingeniería llegan a la conclusión de que no se necesitan nuevos descubrimientos fundamentales para hacer realidad la idea. Las actuales técnicas nucleares, del hidrógeno y de la superconducción, complementadas por energías renovables escogidas, proporcionan todos los ingredientes técnicos que requiere la creación de una Superred. Aunar las voluntades nacionales y sociales con este fin puede plantear un gran problema, como lo plantearía también una parte de la ingeniería necesaria. Mas los beneficios serían también considerables.

Las líneas superconductoras, que transmiten electricidad con un rendimiento casi perfecto, permitirían que los generadores remotos compensasen posibles cortes locales. De este modo, las centrales ubicadas en diferentes zonas climáticas podrían reforzar a las que se enfrentan a picos de la demanda. Y entonces sería posible construir nuevas plantas generadoras en sitios menos conflictivos, alejados de las poblaciones.

Las conexiones de la Superred con estas nuevas plantas de energía proporcionarían a la vez una fuente generadora de hidrógeno y una distribución generalizada por conductos que rodeen y enfríen los hilos superconductores. Una Superred por la que circule hidrógeno no sólo serviría como red de conducción, sino además como un enorme depósito de energía, almacenamiento intermedio requerido para generalizar el uso de fuentes de energía renovables: el viento, el sol o las ma-

Resumen/Una Superred continental

- Los apagones de 2003 en Norteamérica y Europa son vivo testimonio de que la red eléctrica existente a duras penas atiende una demanda creciente. Tampoco está en condiciones de acometer el tránsito de la energía obtenida de combustibles fósiles a la procedente de fuentes más limpias.
- Desde hace varios años se viene trabajando en el proyecto de una nueva infraestructura que permitiría transferir eficazmente energía a las ciudades desde grandes centrales nucleares y plantas de energías renovables situadas en lugares apartados y lejanos.
- Los supercables transmitirían por hilos superconductores de resistencia casi nula una corriente eléctrica de extraordinaria intensidad. Los conductos transportarían además hidrógeno extremadamente frío, en forma de líquido o gas de alta presión, a fábricas, surtidores de combustible para vehículos y tal vez algún día a calderas domésticas.

PAGINAS PRECEDENTES: SLIM FILMS; *CORBIS* (*imagen de satélite al fondo*); BOB SACHA *Corbis* (*energía eólica*); ALAN SCHEIN PHOTOGRAPHY *Corbis* (*edificios de oficinas*); PREMIUM STOCK/CORBIS (*central eléctrica*); GEORGE STEINMETZ *Corbis* (*vista aérea de casas*); *CORBIS* (*paneles solares y subestación*); BMWAG, MUNICH (*coche de hidrógeno*); ZUMA PRESS (*vehículos limpios*); AMERICAN SUPERCONDUCTOR, INC. (*cable superconductor*); ROBERT HARDING *World Imagery/Corbis* (*casas*)

reas. Y constituiría la infraestructura central que necesitan las economías prósperas para abandonar vehículos y centrales de energía que emiten gases de invernadero.

Nueva red para una era nueva

La Superred continental podría parecer una idea futurista, pero el concepto tiene una larga historia. En 1967, Richard L. Garwin y Juri Matisoo, de IBM, publicaron un diseño de cable de transmisión de 1000 kilómetros, de aleación de niobio y estaño, material superconductor a corrientes elevadas. Refrigerado el metal por helio líquido hasta unos pocos grados sobre el cero absoluto, podrían circular a través de este superconductor de resistencia nula corrientes continuas (CC) de extraordinaria intensidad. Propusieron un cable de CC formado por dos conductores (de hilo o cinta superconductora) que en conjunto podrían transportar 100 gigawatt, aproximadamente la producción de 50 centrales nucleares.

Garwin y Matisoo tanteaban posibilidades, aunque resultaran inviables. No tendría sentido inyectar semejante potencia en un punto de la red; la refrigeración por helio líquido resulta ardua. Pero sus ideas inspiraron a otros: en las décadas siguientes se fabricaron cables superconductores de corta longitud y se probaron para el transporte de corrientes alternas (CA) en Brookhaven y Graz; este último funcionó durante varios años conectado a la red local.

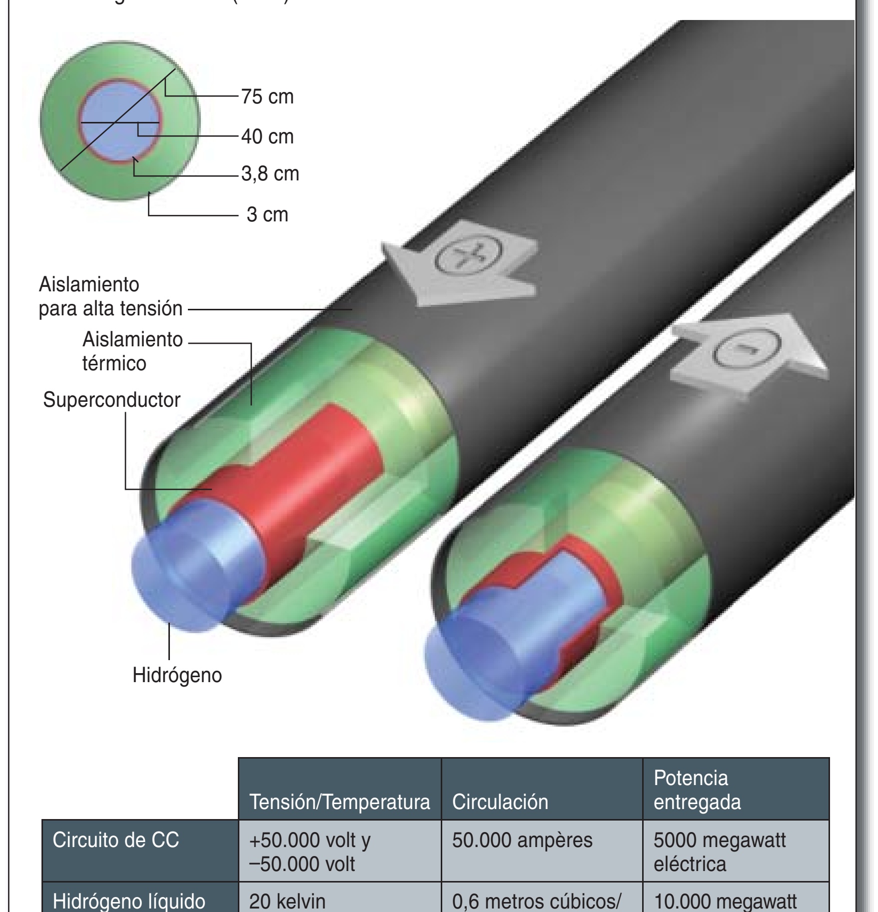
Diez años después, tras el descubrimiento de la superconductividad a altas temperaturas, un estudio del Instituto de Investigaciones de la Energía Eléctrica (EPRI) encontró que, refrigerado por nitrógeno líquido, un "conducto de electricidad" de cinco gigawatt en CC competiría económicamente con un gasoducto o con las líneas aéreas ordinarias para tendidos de 800 o más kilómetros. Dos de los autores (Grant y Starr) desarrollaron la idea en documentos que analizaban la posibilidad de que el hidrógeno extremadamente frío (en estado líquido o gaseoso supercrítico) enfriase los hilos superconductores y a la vez suministrase energía química en un sistema de ámbito continental. En los años 2002 y 2004, el tercer autor (Overbye) organizó talleres en los que docenas de expertos planificaron con detalle la construcción de un segmento piloto de 100 metros, al que podría seguir una interconexión de 50 kilómetros entre redes regionales existentes.

Es importante desarrollar prototipos cuanto antes, pues las redes eléctricas de hoy se acercan cada vez más a la carga máxima tolerable. A veces, como indican los apagones, la sobrepasan. La capacidad generadora total en EE.UU. ha crecido casi un 25 por ciento en los cinco últimos años, mientras que la red de transporte en alta tensión sólo lo ha hecho el 3,3 por ciento. Y la voracidad energética de la sociedad sigue en constante aumento: la Administración de Información de la Energía predice que hacia 2025 el consumo de energía anual en EE.UU. alcanzará los 134 billones de megajoule (127 trillones de BTU), superando en una cuarta parte el consumo de 2005.

La creciente demanda plantea dos problemas: dónde obtener esta nueva energía y de qué manera distribuirla. Es probable que de aquí a 20 años los combustibles fósiles sigan suministrando buena parte de la energía necesaria. Pero es intensa la competición mundial por los limitados recursos de petróleo y gas natural. Bastarían incluso leves caídas de la producción para disparar los precios, como se ha visto en los últimos me-

SUPERCABLES

Los supercables transportarían energía en forma química y eléctrica. La electricidad circularía casi sin resistencia por unos conductos (*en rojo*) de material superconductor. El hidrógeno líquido que fluiría en estado líquido (*en azul*) dentro de esos conductos mantendría su temperatura próxima al cero absoluto. Un supercable integrado por dos conductos, de un metro de diámetro cada uno, podría transmitir al mismo tiempo cinco gigawatt de electricidad y 10 gigawatt de energía térmica (*tabla*).



	Tensión/Temperatura	Circulación	Potencia entregada
Circuito de CC	+50.000 volt y –50.000 volt	50.000 ampères	5000 megawatt eléctrica
Hidrógeno líquido	20 kelvin	0,6 metros cúbicos/segundo en cada conducto	10.000 megawatt térmica

SLIM FILMS

EVOLUCION DE UNA SUPERRED

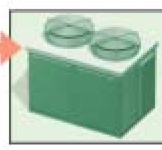
En la transición a una Superred se tardaría al menos una generación entera. La evolución introduciría nuevas técnicas en casi todos los niveles de la infraestructura: generadores, transformadores, transmisión y consumo de energía.

HOY









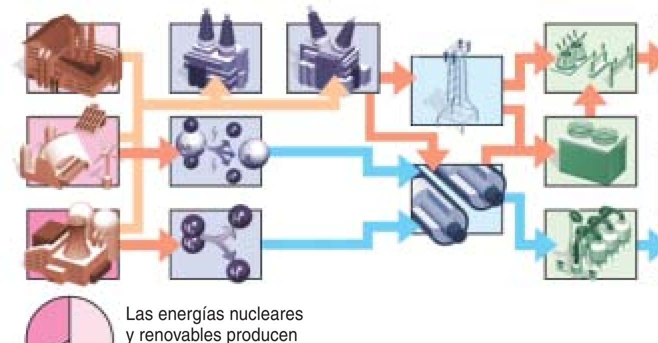


A LOS DIEZ AÑOS DE HABER EMPEZADO A CONSTRUIR LA SUPERRED






A LOS 25 AÑOS DE HABER EMPEZADO A CONSTRUIR LA SUPERRED




SLIM FILMS

ses. Además, el temor al calentamiento por efecto invernadero conduce a otras limitaciones.

Está claro que debemos aprovechar toda oportunidad económicamente viable para escapar de nuestra dependencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, la plena explotación de fuentes de energía renovables, como la eólica, la solar, la biomasa agrícola y en particular la energía nuclear avanzada, exigirá establecer una nueva red de distribución acorde con la nueva era. Para distribuir billones de kilowatt-hora añadidos al año, la red eléctrica estadounidense tendrá que elevar en unos 400 gigawatt su capacidad actual.

La infraestructura existente no podrá superar ese nivel. Los nuevos hilos de aluminio con núcleo de carbono admiten mayor tensión de estiramiento que los habituales de cobre y, por tanto, pueden conducir más corriente sin que las líneas caigan por debajo de alturas seguras. Y las compañías eléctricas de EE.UU. se beneficiarán de lo dispuesto en la Ley de la Energía (*Energy Act*) de 2005, que facilita la apertura de nuevos corredores de transmisión.

Pero las líneas de alta tensión se acercan ya al millón de volt que pueden soportar los aislantes y se aproximan a los límites operativos de los dispositivos semiconductores que controlan las líneas de CC. Y las líneas de corriente alterna pierden su eficacia a distancias de unos 1200 kilómetros porque empiezan a radiar como antenas gigantes la potencia que transportan a 60 o 50 hertz. Se necesitarán, pues, técnicas nuevas para aumentar en centenares de gigawatt la capacidad de las redes de transporte desde generadores lejanos a ciudades importantes.

La próxima generación nuclear

Uno de nuestros objetivos en el diseño de la Superred ha sido que admita entradas de generadores muy dispares, desde un minúsculo panel solar de un tejado o la turbina eólica de una granja hasta el mayor conjunto de reactores nucleares. Pero son las instalaciones grandes las que condicionan muchas de las decisiones básicas de diseño. Y las fuentes renovables todavía arrostran imponentes retos para ofrecer los enormes suplementos de energía que los próximos 20 años requerirán. Basamos, pues, nuestro proyecto en el establecimiento de una cuarta generación de la energía nuclear.

La ley estadounidense de la energía de 2005 destinaba el equivalente de 50 millones de euros al desarrollo de reactores de alta temperatura refrigerados por gas de "cuarta generación". A diferencia de la mayoría de las centrales nucleares actuales, refrigeradas por agua y, por tanto, próximas a grandes masas de líquido (que suelen a su vez estar cerca de poblaciones), los reactores de la venidera generación expulsarán el calor sobrante directamente al aire o a la tierra.

En los diseños más recientes, las reacciones nucleares se ralentizan a medida que la temperatura sobrepasa un margen operativo normal. Tienen, pues, una inherente resistencia a las pérdidas de refrigerante y a los sobrecalentamientos que sufrieron Chernobil y Three Mile Island [*véase* "Nueva generación de la energía nuclear", por James A. Lake, Ralph G. Bennett y John F. Kotek; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2002].

Como todos los generadores de fisión, sin embargo, las centrales de la generación IV producirán residuos radiactivos, por lo que será más económico y políticamente aceptable reunirlas en "agrupaciones nucleares", alejadas de las zonas urbanas, cada una de ellas capaz de producir en torno a 10 gigawatt.

La ubicación remota facilitará la construcción de los reactores y su seguridad. Pero necesitaremos una nueva técnica de transmisión —un supercable— que reduzca drásticamente el coste de transportar la energía a largas distancias.

Los supercables

Por lo que concierne a su aspecto operativo eléctrico, la Superred tiene que transportar decenas de gigawatt a distancias de cientos de kilómetros. Para ello lo ideal es un conductor perfecto. Aunque los materiales superconductores se descubrieron en 1911 y décadas atrás se los ha utilizado ya en dispositivos experimentales, sólo recientemente existe una refrigeración que los mantenga en un frío extremado y cuya sencillez permita su utilización industrial. Los superconductores no están confinados en los escáneres de resonancia magnética y los aceleradores de partículas; están llegando a los sistemas de energía comerciales.

El Departamento de energía norteamericano se ha asociado con fabricantes de equipamiento para la transmisión de energía y compañías eléctricas con la intención de construir prototipos de transformadores, motores, generadores, limitadores de corriente de fallo y cables de transmisión, todo ello mediante superconductores. Japón, la Unión Europea, China y Corea del Sur han iniciado programas de desarrollo similares.

En estos cables se utiliza una cinta superconductora de óxido de cobre enfriada por nitrógeno líquido a 77 kelvin (–196 grados C). Si se emplease como refrigerante el hidrógeno líquido, la temperatura bajaría hasta los 20 kelvin; entraría en el margen de superconducción de materiales nuevos, como el diboruro de magnesio [*véase* "El diboruro de magnesio, superconductor a alta temperatura", por Paul C. Canfield y Sergey L. Bud'ko; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2005].

Hasta ahora, en todas las experiencias con cables superconductores se ha transmitido potencia en corriente alterna, si bien sólo la electricidad en corriente continua puede circular sin resistencia. Con todo, a las frecuencias utilizadas en la red actual los superconductores presentan más o menos la centésima parte de la resistencia del cobre a esa misma temperatura.

El supercable que hemos diseñado incluye un par de hilos superconductores en CC, uno a 50.000 volt positivos y otro a 50.000 volt negativos; ambos transportan 50.000 ampère, corriente muy superior a la que podría soportar cualquier filamento común. Este cable transmitiría alrededor de cinco gigawatt a centenares de kilómetros, con resistencia y pérdida en línea casi nulas. (Hoy se pierde durante la transmisión cerca de la décima parte de la energía eléctrica producida por las centrales.)

Entraría en lo factible un supercable de cinco gigawatt, que rivalizaría en escala con la Interconexión del Pacífico de 3,1 gigawatt, la línea de 500.000 volt de corriente continua que transporta energía entre el norte de Oregón y el sur de California.



1. EL EMBALSE de Raccoon Mountain, en Tennessee, relleno por bombeo, almacena energía suficiente para suministrar 32 gigawatt-hora cuando vierte su contenido por una presa hidroeléctrica. En cada tramo de 70 kilómetros de supercable se podría almacenar en forma de hidrógeno una cantidad de energía equivalente.

TENNESSEE VALLEY AUTHORITY

Bastarían cuatro supercables para distribuir toda la energía generada por la gigantesca presa hidroeléctrica de las Tres Gargantas, en China.

Dado que utilizaría el hidrógeno como refrigerante criogénico, el supercable transportaría energía en forma química y eléctrica. Las centrales nucleares de la próxima generación producirían electricidad o hidrógeno con un rendimiento térmico casi idéntico. Así pues, los operadores de una agrupación de centrales podrían ajustar sin interrupción las proporciones de electricidad y de "hidricidad" que bombearían en la Superred para atender la demanda de electricidad, al tiempo que mantendrían un flujo de hidrógeno suficiente para conservar la superconductividad de los hilos.

Electricidad e hidricidad

La capacidad de elegir entre distintas formas de energía y de almacenar electricidad en forma química abre todo un mundo de posibilidades. Por ejemplo, la Superred reduciría espectacularmente los costes del combustible de los vehículos híbridos propulsados por electricidad y por hidrógeno.

Los coches híbridos actuales circulan con gasolina o gasóleo, pero utilizan baterías para recuperar la energía que se perdería. Los nuevos híbridos "enchufables" que aparecieron el año pasado consumen electricidad además de gasolina [*véase* "Vehículos híbridos", por Joseph J. Romm y Andrew A. Frank; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio 2006]. BMW y Mazda, entre otros, han presentado híbridos de hidrógeno equipados con dos depósitos de combustible y un par de motores que consumen hidrógeno mientras haya disponible y, gasolina, cuando se acabe. Numerosos fabricantes desarrollan vehículos que utilizan las pilas de combustible que llevan a bordo para reconvertir en electricidad el hidrógeno, mediante su combinación con oxígeno.

En los automóviles de mayor rendimiento actuales sólo se transforma en movimiento entre el 30 y el 35 por ciento de la energía que aporta su combustible. Los híbridos de pilas de hidrógeno pueden comportarse mucho mejor, alcanzando con relativa facilidad rendimientos del 50 por ciento, del 60 al 65 por ciento en condiciones óptimas.

Sustituir, aunque sea a escala reducida, los combustibles derivados del petróleo que consume el transporte exigiría enormes cantidades de hidrógeno y de electricidad, así como una infraestructura de distribución eficaz y amplia. La Superred ofrece un modo de llevar a la práctica esa idea: dentro de cada agrupación nuclear, unos reactores generarían electricidad mientras otros producirían hidrógeno; todo ello sin emitir gases de invernadero.

Al transportar conjuntamente electricidad e hidrógeno, la red serviría a la vez de conducción y depósito de energía. En cada sección de 70 kilómetros de supercable formada por conductos de 40 centímetros de diámetro llenos de hidrógeno líquido se almacenarían 32 gigawatt-hora de energía, capacidad equivalente a la del embalse de Raccoon Mountain, la mayor reserva hidroeléctrica de agua bombeada de EE.UU.

Transformando la electricidad en un agente menos efímero, semejante al petróleo o al gas natural, la nueva red podría tolerar las rápidas oscilaciones de la demanda de energía eléctrica con mayor seguridad que ahora. Las conexiones de la Superred a través de husos horarios y climas diferentes permitirían a las centrales eléctricas ceder la energía sobrante en horas nocturnas para atender los picos de demanda eléctrica en ciudades lejanas (*véase la figura 2*). Al atemperar así las fluctuaciones de la demanda, una red de pérdidas tan bajas podría hacer menos necesaria la construcción de nuevas centrales.

Posiblemente, la Superred sería muy eficaz para eliminar una de las grandes limitaciones —la inconstancia— que restringen el uso general de las energías obtenidas del viento, las olas, las mareas y la radiación solar. En lugar de abastecer de electricidad al mercado, las plantas de energía renovable podrían bombear hidrógeno en la red. O bien, unos generadores de referencia vigilarían los ascensos y descensos de la producción de esas plantas y tendrían la capacidad de alterar, mediante electrólisis, su balance entre electricidad e hidricidad.

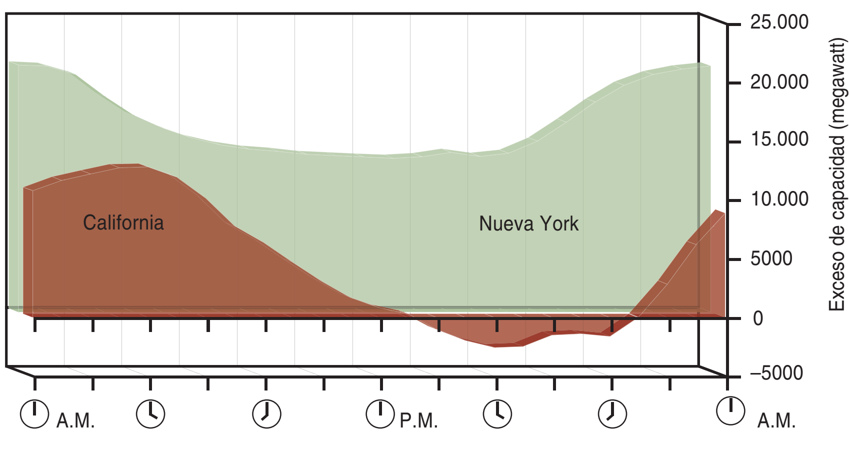
Mirando adelante

No se requieren grandes progresos científicos para empezar a construir la Superred. Las compañías eléctricas han mostrado ya su interés al financiar un proyecto de Superred del EPRI. Abordará los numerosos problemas de ingeniería planteados por la integración de supercables en la red eléctrica existente. La mayor dificultad estriba en encontrar la forma de reaccionar a un fallo de un supercable.

La red actual mantiene su seguridad aunque falle un elemento individual, una línea de alta tensión, digamos. Si la línea llega a tocar un árbol, se abren unos disyuntores que la aíslan de la red y la potencia que circulaba por ella se traslada casi instantáneamente a otras líneas. Pero todavía no hemos diseñado un disyuntor capaz de cortar la extraordinaria corriente que pasa por un supercable; es preciso que esa técnica evolucione. Tal vez habrá que desarrollar técnicas novedosas para asimilar el notable trastorno que una pérdida de potencia tan enorme ocasionaría en la red eléctrica convencional. La interrupción de un supercable provocaría el colapso del campo magnético circundante; en el punto de corte se crearía un pico de tensión, breve e intenso. El aislamiento de los cables tendría que poder aguantar esa momentánea sobretensión.

Otro reto proviene del transporte seguro de grandes cantidades de hidrógeno por el supercable. La in-

2. LA SUPERRED CONTINENTAL ayudaría a evitar apagones y sobrecargas porque permitiría a los operadores transmitir grandes potencias a larga distancia. En un cálido día de verano, por ejemplo, la demanda de electricidad en California (*rojo*) puede sobrepasar durante varias horas la capacidad generadora activa de ese estado. En cambio, los generadores del estado de Nueva York tienen capacidad en exceso (*verde*) y, por tanto, podrían compensar ese déficit.



dustria petroquímica y los programas espaciales han adquirido larga experiencia en bombear hidrógeno, gaseoso o líquido, por conductos de varios kilómetros, técnica que se perfeccionará con el uso creciente del gas natural licuado. El hidrógeno posee un potencial explosivo (contenido de energía por unidad de masa) aproximadamente doble que el metano del gas natural. Además, se escapa con mayor facilidad y puede inflamarse con menores concentraciones de oxígeno, por lo que ha de ser hermética la infraestructura de distribución y almacenamiento de hidrógeno. En los ensayos de tanques de hidrógeno para vehículos se han conseguido ya revestimientos capaces de resistir presiones de hasta 700 kilogramos por centímetro cuadrado.

La mejor manera de proteger los supercables sería tenderlos por túneles profundos. El soterramiento podría reducir la oposición pública y política a los nuevos tendidos.

Los costes de los túneles son elevados, aunque tienden a descender merced a los grandes avances en la construcción subterránea y las microtuneladoras, como han demostrado la galería de aguas número 3 de la ciudad de Nueva York y las gigantescas alcantarillas de escorrentía de Chicago. Junto al río Niágara se está excavando con perforadoras automáticas un túnel hidroeléctrico de 10,4 kilómetros de largo y 14,4 metros de diámetro, a un coste que ronda los 500 millones de euros. Unos estudios recientes del Fermilab estiman que construir un túnel de 800 kilómetros de largo y tres metros de ancho, a 150 metros de profundidad, costaría menos de 800 euros por metro.

Los supercables transportarían potencias que multiplicarían las transmitidas por las líneas eléctricas actuales, lo que fomentaría la rentabilidad del soterramiento. Y habría que abordar la introducción de otras innovaciones técnicas y los límites económicos que impone la construcción subterránea.

Para poner en marcha la Superred y detallar sus costes, los participantes en el Taller Superred de 2004 propusieron construir un supercable de un kilómetro que transportara varios centenares de megawatt. Este primer segmento sólo sometería a prueba los componentes superconductores, refrigerados con nitrógeno líquido. El proyecto podría patrocinarlo el Departamento estadounidense de energía, construirlo un laboratorio nacional y supervisarlo un consorcio de compañías eléctricas y operadores de transmisión regionales. El éxito de este prototipo debería culminar en una demostración sobre un trayecto de 30 a 80 kilómetros que aliviara los embotellamientos que padece la red actual mediante el refuerzo de las interconexiones, crónicamente congestionadas, entre redes regionales contiguas.

El precio resultará en todo caso determinante. De él dependerá que los países consigan aunar voluntades políticas y sociales para la construcción de una Superred. La inversión sería enorme: quizá se acerque al billón de euros de hoy. En cualquier caso, rebasaría la escala de tiempo atractiva para la inversión privada. Es difícil estimar el coste de establecer una Superred a través de múltiples décadas y generaciones. Pero sí es posible apreciar los beneficios finales: una infraestructura de energía doméstica sin carbono, respetuosa para el entorno, que proporcionaría seguridad física y económica.

Los autores

Paul M. Grant, doctor en físicas por la Universidad de Harvard, trabajó en el Laboratorio de Investigación de San José, donde participó en el descubrimiento de la superconductividad de alta temperatura. De 1993 a 2004 fue miembro del Instituto de Investigaciones de la Energía Eléctrica (EPRI), fundado en 1973 por **Chauncey Starr,** galardonado con la Medalla Nacional de Tecnología de Estados Unidos en 1990; investigó éste sobre criogenia, dirigió la división de energía atómica de Rockwell Internacional, fue cofundador de la Sociedad Nuclear Norteamericana y presidente del EPRI durante más de una década. **Thomas J. Overbye**, profesor de ingeniería eléctrica e informática de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, contribuyó a la investigación oficial del apagón norteamericano de 2003.

Bibliografía complementaria

NACIONAL ENERGY PLANNING FOR THE CENTURY. Chauncey Starr en *Nuclear News*, vol. 45, n.º 31, págs. 31-35; febrero de 2002.

THE SUPERCABLE: DUAL DELIVERY OF CHEMICAL AND ELECTRIC POWER. Paul M. Grant en *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, n.º 2, págs. 1810-1813; junio de 2005.

W. WAYT GIBBS

¿Qué ven las aves?



La evolución dotó a las aves con un sistema de visión cromática que supera al de todos los mamíferos, hombre incluido

Timothy H. Goldsmith



Los humanos solemos considerar que nuestro sistema visual se halla en la cúspide del éxito evolutivo. Nos permite apreciar el espacio en tres dimensiones, detectar objetos a cierta distancia y movernos con seguridad. Reconocemos a otros individuos y leemos sus emociones con una simple mirada a su rostro. Dependemos tanto de la visión, que se nos hace difícil imaginar los mundos sensoriales de animales cuya capacidad se extiende a otros ámbitos; así, el del murciélago que caza de noche, que se sirve de la ecolocación para descubrir la situación de un insecto.

Nuestro conocimiento de la visión cromática se basa, como es obvio, en lo que vemos: los investigadores realizan experimentos sobre voluntarios para descubrir, pongamos por caso, qué mezclas de colores les parecen iguales o distintas. Aunque se contaba con información de apoyo procedente de otras especies obtenida mediante registros de la excitación neuronal, hasta los primeros años setenta del siglo pasado los expertos no se percataron de que muchos vertebrados, en su mayoría distintos de los mamíferos, veían colores de una franja del espectro invisible a los humanos: el ultravioleta cercano.

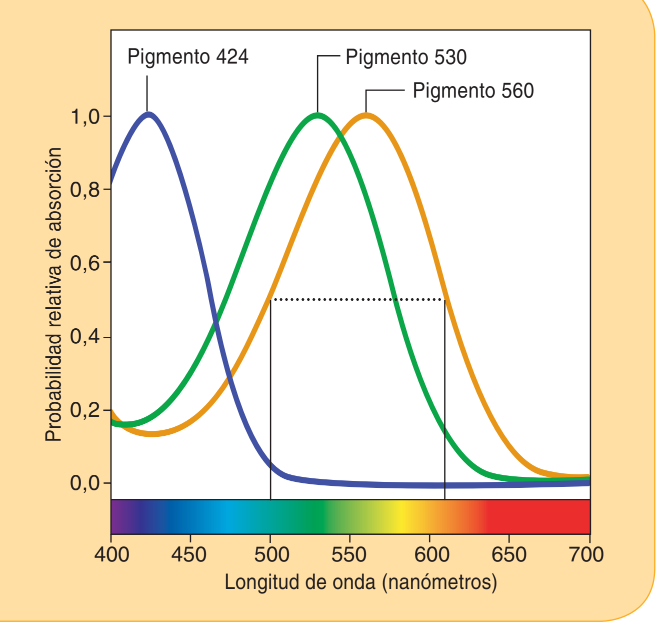
1. CALAO DE LEADBEATER (*Bucorvus leadbeateri*). Como todas las aves, ve el mundo en una rica paleta cromática que los humanos apenas podemos imaginar. Las aves poseen esta capacidad porque han conservado en el ojo conos procesadores del color que los mamíferos perdieron hace millones de años.

MARTIN HARVEY *Peter Arnold, Inc.*

Visión cromática en humanos

Como resultado de interacciones entre tres tipos de conos en la retina del ojo: así perciben humanos y otros primates los colores que ven. Cada tipo de cono contiene un pigmento distinto, sensible a una gama dada de longitudes de onda luminosas. Los tres tipos de conos muestran sensibilidad máxima hacia los 560, 530 y 424 nanómetros.

Las dos líneas verticales que aparecen en el gráfico corresponden a longitudes de onda que absorbe el pigmento de 560 nanómetros. Aunque los fotones de 500 nanómetros (*en el azul-verde*) son más energéticos que los de 610 nanómetros (*en el anaranjado*), ambos generan la misma respuesta del pigmento y, por tanto, la misma excitación del cono. Así pues, un cono no revela al cerebro la longitud de onda de la luz absorbida. Para distinguir una longitud de onda de otra, el cerebro debe comparar señales procedentes de conos con pigmentos visuales distintos.



El descubrimiento de la visión ultravioleta empezó con estudios de insectos y con la curiosidad de sir John Lubbock, lord Avebury. Amigo y vecino de Charles Darwin, miembro del Parlamento, banquero, arqueólogo y naturalista, Lubbock descubrió, en fecha anterior a 1882, que, en presencia de radiación ultravioleta, las hormigas tomaban sus ninfas y las llevaban a áreas oscuras o a zonas iluminadas por luz de longitudes de onda mayores.

Más tarde, desde mediados del siglo XX, el naturalista austríaco Karl von Frisch y sus discípulos irían demostrando que las abejas y las hormigas no sólo ven la radiación ultravioleta como un color distinto, sino que usan, además, el ultravioleta de la luz natural como brújula celeste.

Resumen/Evolución de la visión

- La visión cromática de los vertebrados depende de los conos de la retina. Las aves, los lagartos, las tortugas y peces de múltiples especies, poseen cuatro tipos de conos. La mayoría de los mamíferos, en cambio, poseen sólo dos.
- Los mamíferos primitivos contaban con la dotación completa de conos. Sin embargo, durante un período de su evolución en el que eran sobre todo nocturnos (la visión cromática no resultaba crucial para su supervivencia), perdieron dos tipos de conos.
- Los antepasados de un grupo de primates del Viejo Mundo, que incluye a los humanos, “recuperó” un tercer tipo de cono mediante la mutación de uno de los conos existentes.
- Sin embargo, la mayoría de los mamíferos cuentan todavía con sólo dos conos. La visión cromática de los mamíferos (incluidos el hombre y sus parientes primates) es, por tanto, limitada en comparación con la visión de las aves.

El descubrimiento de que un gran número de insectos percibían la radiación ultravioleta condujo a la hipótesis de que esta región del espectro luminoso proporcionaba un canal sensorial privado, inaccesible para las aves depredadoras. Nada más alejado de la verdad. Las investigaciones realizadas a lo largo de los últimos 35 años han demostrado que las aves, los lagartos, las tortugas y peces múltiples poseen receptores del ultravioleta en su retina. ¿Por qué, pues, la rareza de los mamíferos? ¿Qué hizo que se empobreciera su visión cromática? La búsqueda de respuestas nos ha revelado un curso evolutivo fascinante, al tiempo que ha aportado un mayor conocimiento del mundo visual de las aves, de extraordinaria riqueza.

Evolución de la visión cromática

Para hacernos una ideal cabal de lo descubierto, conviene repasar algunos detalles básicos sobre la percepción del color. Conviene empezar abandonando un error común. Es cierto que los objetos absorben algunas longitudes de onda de la luz y reflejan el resto, y que los colores que percibimos “en” los objetos guardan relación con las longitudes de onda de la luz reflejada. Pero el color no constituye una propiedad de la luz, ni de los objetos que la reflejan, sino una sensación que proviene del cerebro.

En los vertebrados, la visión del color empieza en los conos de la retina, la capa de neuronas que transmiten las señales ópticas al cerebro. Cada cono contiene un pigmento que corresponde a alguna variante de la proteína opsina, unida a una pequeña molécula llamada retinal, emparentada con la vitamina A. Cuando el pigmento absorbe luz (o, más exactamente, fotones), el retinal cambia de forma; ello desencadena una cascada de acontecimientos moleculares que conducen a la excitación del cono. Dicha excitación provoca, a su vez, la activación de neuronas de la retina, que disparan

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: TIMOTHY H. GOLDSMITH

impulsos en el nervio óptico para transmitir información al cerebro acerca de la luz recibida.

Cuanto mayor es la intensidad de la luz, mayor número de fotones absorben los pigmentos visuales, mayor la excitación de cada cono y, también, mayor el brillo con que percibimos esa luz. Pero la información que transmite un cono es limitada: por sí sola, la célula no le dice al cerebro qué longitud de onda provocó su excitación. Algunas longitudes de onda se absorben mejor que otras; cada pigmento visual se caracteriza por un espectro que describe la variación de la absorción en función de la longitud de onda. Un pigmento visual podría absorber, de manera idéntica, dos longitudes de onda, mas aunque sus fotones contengan energías distintas, el cono no las diferencia, pues ambas provocan un cambio de forma en el retinal y con ello desencadenan la misma cascada molecular excitadora. Un cono se limita a contar los fotones que absorbe; no distingue entre una longitud de onda y otra. De ahí que una luz intensa con longitud de onda de escasa absorción y una luz débil con longitud de onda de absorción elevada provoquen la misma excitación en un cono.

Así pues, para que el cerebro vea un color, debe comparar las respuestas de dos o más clases de conos que contengan pigmentos visuales distintos. La presencia de más de dos tipos de conos en la retina confiere una mayor capacidad para discriminar entre colores.

Las opsinas ofrecen una vía de estudio de la evolución de la visión cromática. Los expertos deducen las relaciones evolutivas de las opsinas en las distintas clases de conos y en especies diferentes mediante el examen de las secuencias de bases nucleotídicas en los genes que codifican estas proteínas. Los árboles evolutivos resultantes revelan que las opsinas corresponden a proteínas antiguas, que existían antes de la aparición de los grupos de animales predominantes que hoy pueblan la Tierra.

Hay cuatro linajes de pigmentos de conos de vertebrados; se denominan en función de la región espectral en la que muestran mayor sensibilidad: longitud de onda larga, longitud de onda media, longitud de onda corta y ultravioleta. Todos los grupos principales de vertebrados poseen bastones en la retina, así como conos. Los bastones, que contienen el pigmento visual rodopsina, proporcionan visión en luz muy tenue. En cuanto a la estructura y el patrón de absorción, la rodopsina guarda semejanza con los pigmentos de los conos más sensibles a las longitudes de onda medias; la proteína evolucionó a partir de dichos pigmentos hace cientos de millones de años.

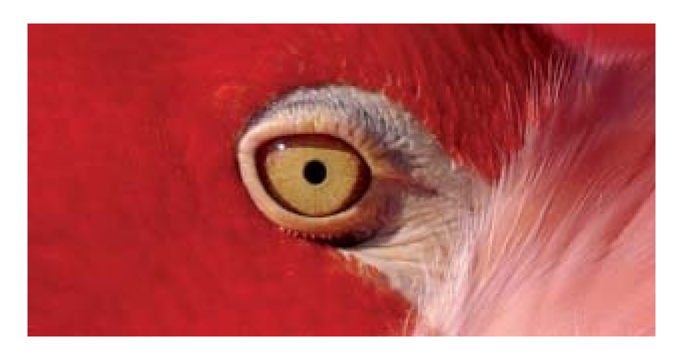
LA VENTAJA DE LAS AVES

Mediante el análisis del ADN de especies contemporáneas, se han determinado los cambios que han sufrido los pigmentos de los conos durante la evolución de los vertebrados. Los vertebrados primitivos poseían cuatro tipos de conos (*triángulos de color*); cada uno contenía un pigmento distinto. Los mamíferos perdieron dos de estos conos en los albores de su evolución, quizá porque eran entonces nocturnos y los conos no se precisaban para la visión en luz tenue. Las aves y la mayoría de los reptiles, en cambio, conservaron cuatro pigmentos espectralmente distintos.

Tras la extinción de los dinosaurios, los mamíferos empezaron a diversificarse. El linaje que dio origen a los primates del Viejo Mundo actuales (monos africanos, simios y humanos) "recuperó" un tercer cono mediante la duplicación y subsiguiente mutación del gen de uno de los pigmentos que quedaban. Al evolucionar a partir de este linaje de primates, los humanos diferimos de la mayoría del resto de mamíferos por poseer tres conos (en lugar de dos) y, por tanto, visión tricromática. Aunque suponga un avance, no se acerca, ni de lejos, al refinado mundo visual de las aves.



JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: TIMOTHY H. GOLDSMITH



Flamenco

Las aves poseen cuatro pigmentos espectralmente definidos; cada uno de ellos surgió de uno de los cuatro linajes evolutivos. Los mamíferos, en cambio, poseen sólo dos: uno con sensibilidad máxima en el violeta y otro sensible a las longitudes de onda largas. La explicación plausible de tamaña pobreza de conos se apoya en su historia: durante su evolución temprana en el Mesozoico (hace entre 245 y 65 millones de años), los mamíferos eran pequeños, sigilosos y nocturnos. A medida que sus ojos evolucionaban y se adaptaban a las condiciones nocturnas, se hicieron cada vez más dependientes de la sensibilidad de los bastones y menos dependientes de la visión cromática. En consecuencia, perdieron dos de los cuatro pigmentos de conos que sus antepasados poseían, pigmentos que persisten en la mayoría de los reptiles y las aves.

La desaparición de los dinosaurios hace 65 millones de años ofreció a los mamíferos nuevas oportunidades para la especialización. Y empezaron a diversificarse. Un grupo —entre ellos los progenitores de los humanos y de otros primates del Viejo Mundo que viven en la actualidad— adoptó una vida diurna, se extendió por los árboles e hizo de los frutos una parte importante de su dieta. Los colores de flores y frutos suelen contrastar con el follaje circundante, pero los mamíferos, con sólo un pigmento de cono sensible a las longitudes de onda largas, habrían sido incapaces de ver colores contrastantes en las regiones verde, amarilla y roja del espectro. Sin embargo, la caja de herramientas evolutiva contenía una solución para estos primates.

De forma ocasional, en las divisiones celulares que tienen lugar durante la formación de óvulos y espermatozoides, un intercambio desigual de fragmentos cromosómicos lleva a la producción de un gameto que posee un cromosoma con copias supernumerarias de uno o más genes. Si las generaciones subsiguientes mantienen estos genes supernumerarios, la selección natural puede conservar mutaciones útiles que surjan en ellos. Jeremy Nathans y David Hogness, de la Universidad de Stanford, han demostrado que sucedió un fenómeno de ese tipo durante los últimos 40 millones de años en el sistema visual de nuestros primates ancestrales del Viejo Mundo: el intercambio desigual de ADN en una célula reproductora y la mutación subsiguiente de una copia suplementaria de un gen para un pigmento sensible a longitudes de onda largas resultó en la creación de un segundo pigmento sensible a longitudes de onda largas, que presentaba un desplazamiento en la longitud de onda de sensibilidad máxima. Este linaje de primates difiere, por tanto, del linaje de los demás mamíferos, ya que posee tres pigmentos de conos, en vez de los dos acostumbrados, y, por tanto, visión tricromática.

Aunque supone un avance notable, este sistema no nos dota de la quintaesencia de la visión cromática. Sigue siendo el resultado de una recuperación evolutiva: por un pigmento, se queda corto del sistema visual tetracromático que opera en las aves y en numerosos reptiles y peces. Nuestra herencia génica nos pone trabas también. Nuestros dos genes para pigmentos sensibles a longitudes de onda largas se encuentran en el cromosoma X. Puesto que los machos poseen sólo un cromosoma X, las mutaciones en uno u otro de estos genes pueden reducir la capacidad del macho para distinguir entre rojos y verdes. Las hembras, en cambio, padecen con menor frecuencia este tipo de ceguera para el color: si un gen pigmentario sufre una alteración en una copia del cromosoma X, todavía pueden fabricar el pigmento según las indicaciones del gen sano en su otra copia de X.

Los pigmentos de los conos no son los únicos elementos de la retina que se perdieron en el curso de la evolución temprana de los mamíferos. Cada cono de un ave o reptil contiene una gotita de aceite coloreada; dichas gotitas ya no existen en los conos de los mamíferos. Las gotitas, que contienen concentraciones elevadas de carotenoides, están situadas de manera tal, que la luz las atraviesa justo antes de alcanzar el rimero de membranas del segmento externo del cono, donde se aloja el pigmento visual. Operan, por tanto, como filtros: eliminan las longitudes de onda cortas y estrechan el espectro de absorción de los pigmentos visuales. De ese modo se reduce la superposición espectral entre pigmentos y aumenta el número de colores que un ave discierne.

Visión cromática en las aves

La presencia, en las aves, de cuatro tipos de conos que contienen pigmentos visuales distintos significa que gozan de visión cromática. Sin embargo, para comprobar tal hipótesis se requieren experimentos conductuales en los que se demuestre que las aves discriminan entre objetos coloreados. En los ensayos en cuestión deben eliminarse el brillo y otras pistas que las aves pudieran estar usando. Aunque ya se han realizado pruebas de este tipo, sólo en los dos últimos decenios se ha empezado a examinar la función de los conos ultravioleta.

Con Byron K. Butler, antiguo alumno mío, decidí utilizar la técnica de la equiparación de color para explorar de qué modo participan en la visión los cuatro conos.

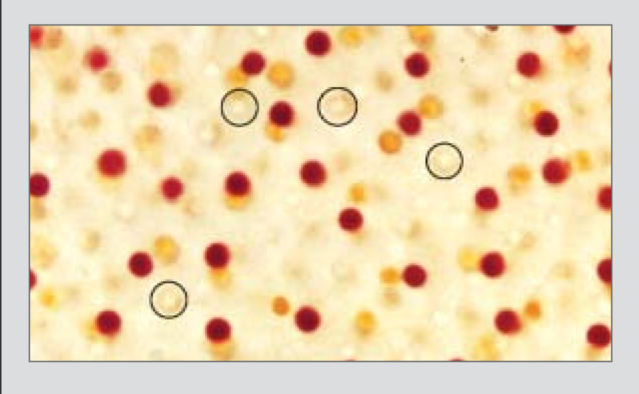
Para entender en qué consiste la equiparación de color, consideremos primero nuestra propia visión cromática. En los humanos, una luz amarilla excita ambos tipos de cono de longitud de onda larga. Pero existe, además, una combinación de luces rojas y verdes que excita a los mismos dos conos en igual medida: por tanto, un observador percibirá esta mezcla como una luz amarilla pura. En otras palabras, dos luces físicamente distintas pueden equipararse en color, lo que nos ratifica una vez más que la percepción del color se produce en el cerebro. Nuestro cerebro discrimina entre colores en esta región del espectro a través de la comparación de la información que le llega de los dos conos de longitud de onda larga.

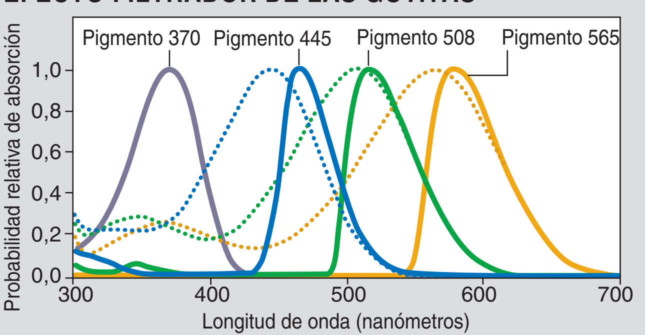
BORIS ROESSLER DPA/*Corbis*

GOTITAS DE ACEITE EN LOS CONOS

Los conos de las aves y de muchos otros vertebrados han conservado varias características que se han perdido en los mamíferos. La que reviste mayor importancia para la visión cromática es la presencia de gotitas de aceite: rojas, amarillas, casi incoloras y transparentes. La micrografía de una retina de carbonero (*izquierda*) muestra con claridad las gotitas amarillas y rojas; círculos negros señalan varias de las gotitas incoloras. Todas ellas, con excepción de las transparentes, operan como filtros que eliminan la luz de longitudes de onda cortas.

El efecto de filtrado estrecha la sensibilidad espectral de tres de los cuatro conos de las aves y la desplaza a longitudes de onda más largas (*gráfico*). Al restringir las longitudes de onda a las que responden los conos, las gotitas facilitan la distinción de un número mayor de colores. El ozono de la atmósfera superior absorbe longitudes de onda inferiores a 300 nanómetros; por ello, la visión ultravioleta para las aves implica sólo el ultravioleta cercano: la banda de longitudes de onda que va de los 300 a los 400 nanómetros.



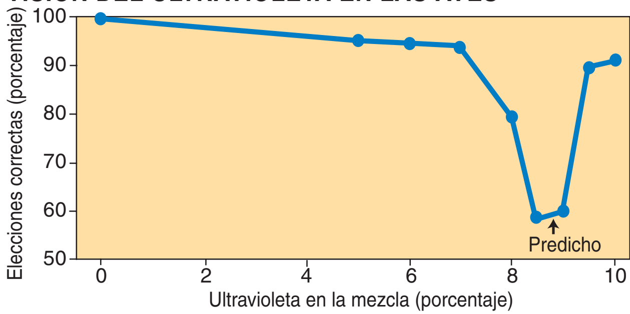


Conocidas las propiedades físicas de los cuatro conos y de las gotitas de aceite, Butler y el autor calcularon qué mezcla de longitudes de onda rojas y verdes veían las aves como una longitud de onda amarilla concreta. (Al no ser idénticos los pigmentos visuales humanos y aviarios, tal combinación difería de la predicha para humanos.) Si la percepción cromática de las aves coincidía con las predicciones, se confirmarían nuestras mediciones de pigmentos visuales y de gotitas de aceite. El paso siguiente consistiría en averiguar si los conos sensibles al ultravioleta se hallaban implicados en la visión del color y de qué modo.

Realizamos un experimento con periquitos (*Melopsittacus undulatus*). A esos loritos australianos les enseñamos a asociar una luz amarilla con recompensas alimenticias. Desde el posadero del ave se veía un par de luces situadas a un metro de distancia. Una correspondía a la luz amarilla de adiestramiento, la otra a una mezcla variable de rojo y verde. Durante la prueba, el periquito volaba a la luz que anticipaba comida. Si iba a la luz amarilla, se abría brevemente una pequeña tolva con semillas, de la que tomaba un bocado rápido. Si se dirigía a la luz equivocada, no obtenía ninguna recompensa. Cambiábamos la composición de la mezcla de rojo y verde en una secuencia irregular; variábamos también la posición de las dos luces, para que el ave no pudiera asociar el alimento con el lado derecho o el izquierdo. Asimismo, modificábamos la intensidad de la luz de adiestramiento, para que no se apoyara en la luminosidad a modo de clave.

En la mayoría de las mezclas de rojo y verde, los periquitos seleccionaron la luz amarilla de adiestramiento y obtuvieron las semillas. Pero cuando la mezcla contenía alrededor de un 90 por ciento de rojo y un 10 por ciento de verde (proporción equivalente al amarillo de la luz de adiestramiento), los pájaros se confundían y sus elecciones se tornaban erráticas.

Acometimos luego experimentos similares para demostrar que los conos ultravioleta contribuyen a la visión tetracromática del color. Adiestramos las aves a recibir comida bajo una luz violeta. Exploramos su capacidad para diferenciar esta longitud de onda de mezclas de azul y de una amplia banda de longitudes de onda del ultravioleta cercano. Las aves distinguieron la luz violeta



2. ¿VEN LAS AVES LAS LONGITUDES DE ONDA del ultravioleta como colores distintos? Este experimento demuestra que sí. Se adiestraron periquitos para que distinguieran una luz de adiestramiento violeta de una luz mezcla de azul y ultravioleta. Cuando la mezcla contenía sólo alrededor del 8 por ciento de ultravioleta, las aves la confundían (porque percibían el mismo color) con la luz de adiestramiento y erraban su elección. En el punto (*flecha*) que el autor predijo —a partir de mediciones de los pigmentos visuales y de las gotitas de aceite de los conos de las aves— que la percepción de ambos colores coincidiría, las elecciones respondían a un patrón aleatorio.

TIMOTHY H. GOLDSMITH (*micrografía*); JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: TIMOTHY H. GOLDSMITH (*gráficas*)



Guacamayo

de la mayoría de las mezclas. Sin embargo, sus elecciones eran aleatorias cuando la combinación constaba de un 92 por ciento de azul y un 8 por ciento de ultravioleta, proporciones que hacían que la mezcla resultara indistinguible de la luz de adiestramiento violeta.

De tales resultados se desprendía, pues, que las aves ven las longitudes de onda ultravioletas como colores distintos y que los conos ultravioleta participan en la visión tetracromática.

Más allá de la percepción humana

Nuestros experimentos demostraron que las aves utilizan los cuatro conos en su visión cromática.

Para los humanos resulta difícil —de hecho, imposible— saber cómo las aves perciben el color. No sólo ven en el ultravioleta cercano, sino también colores que ni siquiera podemos imaginar. La representación gráfica de nuestra visión tricromática correspondería a un triángulo, mientras que su visión tetracromática requeriría una dimensión adicional: un tetraedro o pirámide de base triangular. El espacio situado por encima del suelo del tetraedro aviar abarca una paleta de colores que supera de largo la experiencia humana.

¿De qué modo podrían utilizar las aves esta profusión de información cromática? En numerosas especies de ellas, los machos exhiben colores más vivos que las hembras. Tras el descubrimiento de la sensibilidad al ultravioleta, se inició la búsqueda de pruebas de la influencia de colores ultravioleta no visibles al ojo humano sobre la elección de pareja.

Muir Eaton, entonces en la Universidad de Minnesota, estudió 139 especies de aves en las que ambos sexos presentan, ante los ojos de un observador humano, el mismo aspecto. A partir de las longitudes de onda de la luz reflejada por el plumaje, dedujo que en más del 90 por ciento de las especies afectadas el ojo de un ave veía diferencias entre machos y hembras que los ornitólogos no advertían.

En un estudio de machos de 108 especies de aves australianas, un grupo internacional dirigido por Franziska Hausmann, de la Universidad Griffith en Brisbane, encontró colores con componente ultravioleta en el plumaje implicado en exhibiciones de cortejo con mayor presencia que en plumas de otras partes del cuerpo. Grupos ingleses, suecos y franceses han estudiado el herrerillo común (*Parus caeruleus*), un paseriforme eurasiático, y el estornino pinto (*Sturnus vulgaris*); los resultados indican que las hembras se sienten atraídas por los machos que muestran la mayor reflectancia en el ultravioleta. ¿Y qué sentido encierra ello?

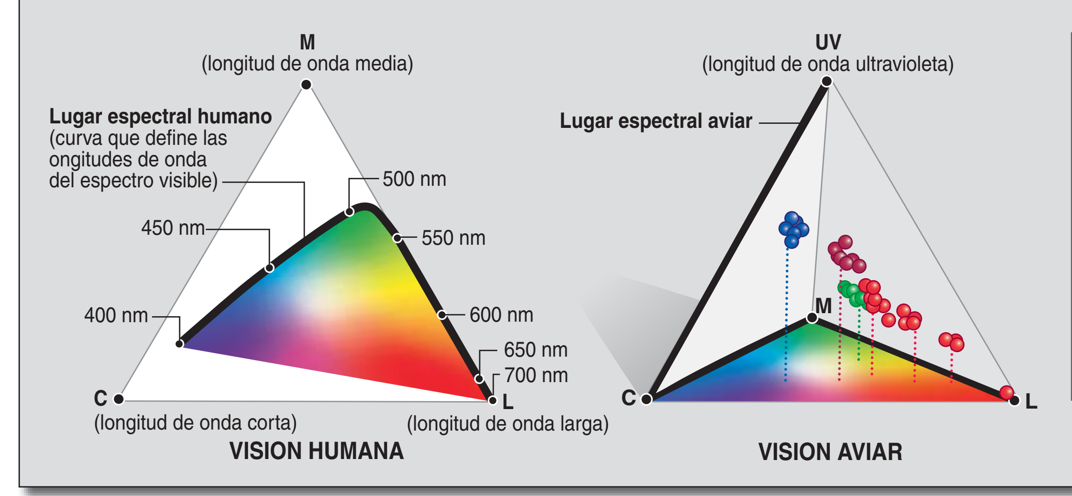
MARTIN HARVEY *Corbis* (*guacamayo*); ARTHUR MORRIS *Corbis* (*azulín sietecolores*); JEN CHRISTIANSEN;
FUENTE: TIMOTHY H. GOLDSMITH (*gráficas*)

EL MUNDO VISUAL DE LAS AVES

La visión cromática de los humanos puede cartografiarse en un triángulo. Los colores del espectro que vemos se sitúan a lo largo de la curva negra gruesa inscrita dentro del triángulo; los otros colores, constituidos por mezclas de luces, se sitúan por debajo de la curva.

Para cartografiar la visión cromática de las aves necesitamos añadir otra dimensión. Le corresponde una representación tridimensional: un tetraedro. Todos los colores que no activan el receptor de ultravioleta se sitúan en la base de la figura; dado que las gotitas de aceite de los conos aumentan el número de colores que un ave percibe, el lugar espectral sigue los bordes del suelo triangular, en vez de la forma en aleta de tiburón del triángulo cromático de los humanos. Los colores que implican el receptor de ultravioleta caen en el espacio situado sobre el suelo. Por ejemplo: el plumaje rojo, verde y azul del gorrión o azulín mosaico, mariposa o sietecolores (*Passerina ciris, fotografía*), refleja cantidades variables de radiación ultravioleta, además de los colores que los humanos vemos (*gráfico*).

Para indicar de forma gráfica los colores que la hembra de azulín sietecolores ve cuando mira a su pareja, debemos movernos del plano del triángulo al volumen del tetraedro. Los colores reflejados





MACHO DE AZULIN SIETECOLORES

Imaginar un mundo ultravioleta

Aunque nadie sabe qué ven las aves, estas imágenes de alma de poeta o rudbeckia (*Rudbeckia hirta*) ofrecen un atisbo del modo en que la visión ultravioleta cambia el aspecto del mundo. Para nosotros, el centro de la flor es un pequeño disco oscuro (*izquierda*). Pero una cámara equipada para detectar sólo la radiación ultravioleta “ve” mucho más: por ejemplo, un anillo alrededor del disco (*derecha*). Estas fotografías las realizó Andrew Davidhazy, profesor de imagen y técnica fotográfica del Instituto de Tecnología de Rochester.



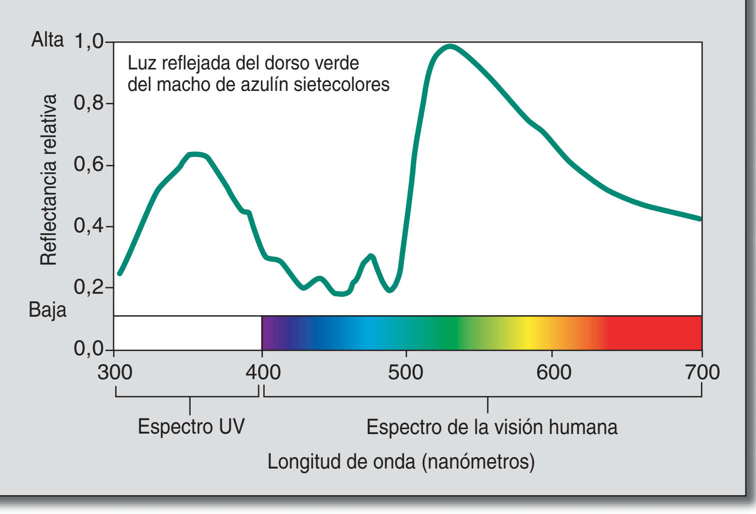


La reflectancia del plumaje de las aves en el ultravioleta depende de la estructura submicroscópica de las plumas, de modo que puede servir como un indicador de la salud de las aves macho. Amber Keyser y Geoffrey Hill, de las universidades de Georgia y de Auburn, han demostrado que los machos de picogordo azul o azulejo maicero (*Guiraca caerulea*) con el azul más brillante y cercano al ultravioleta en su plumaje son de mayor tamaño, defienden territorios de mayor extensión con presas abundantes y alimentan a sus crías con mayor frecuencia que los demás machos.

De forma más general, poseer un receptor de ultravioleta puede conferir ventaja a la hora de buscar comida. Dietrich Burkhardt, de la Universidad de Ratisbona, ha demostrado que las superficies céreas de numerosos frutos y bayas reflejan la luz ultravioleta que podría advertir de su presencia. El equipo de Jussi Viitala, de la Universidad finlandesa de Jyväskylä, ha descubierto que el cernícalo vulgar (*Falco tinnunculus*) localiza visualmente los rastros de topillos. Estos pequeños roedores dejan pistas olorosas de orina y heces que reflejan la radiación ultravioleta, lo que las hace visibles a los receptores de ultravioleta del halcón, sobre todo en primavera, antes de que las marcas olorosas queden cubiertas por la vegetación.

¿Para qué les sirve la visión ultravioleta a las aves? Esta pregunta da a entender que la sensibilidad al ultravioleta corresponde a una peculiaridad o incluso a una característica de la que toda ave que se precie podría prescindir. Vivimos tan atrapados en el mundo de nuestros propios sentidos que, si bien comprendemos —y tememos— una pérdida de la visión, no podemos conjurar una imagen de un mundo visual más allá del nuestro. Resulta humillante darse cuenta de que la perfección evolutiva constituye una quimera y de que el mundo no coincide en absoluto con lo que imaginamos a través de la lente del engreimiento humano.

desde pequeñas regiones de las plumas se representan mediante grupos de puntos: rojo vivo para el pecho y la garganta, rojo más oscuro para el obispillo, verde para el dorso y azul para la cabeza. (Por supuesto, no podemos mostrar los colores que el pájaro ve, porque ningún humano los percibe.) Cuanto mayor es el componente ultravioleta del color, más elevados se encuentran los puntos sobre el suelo. Aparece una distribución de puntos dentro de cada uno de los grupos porque las longitudes de onda de la luz reflejada varían en el seno de las regiones; los humanos lo vemos como áreas rojas del pecho y la garganta.



El autor

Timothy H. Goldsmith es profesor emérito de biología molecular, celular y del desarrollo en la Universidad de Yale. Ha dedicado cinco decenios al estudio de la visión de crustáceos, insectos y aves.

Bibliografía complementaria

THE VISUAL ECOLOGY OF AVIAN PHOTORECEPTORS. N. S. Hart en *Progress in Retinal and Eye Research*, vol. 20, n.º 5, págs. 675-703; septiembre 2001.

ULTRAVIOLET SIGNALS IN BIRDS ARE SPECIAL. Franziska Hausmann, Kathryn E. Arnold, N. Justin Marshall y Ian P. F. Owens en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 270, n.º 1510, págs. 61-67; 7 de enero, 2003.

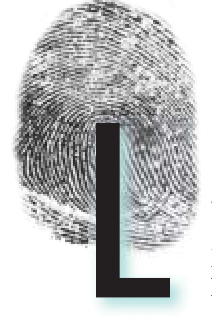
COLOR VISION OF THE BUDGERIGAR (*MELOPSITTACUS UNDULATUS*): HUE MATCHES, TETRACHROMACY, AND INTENSITY DISCRIMINATION. Timothy H. Goldsmith y Byron K. Butler en *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 191, n.º 10, págs. 933-951; octubre 2005.



REALIDAD Y FICCION DE LA CIENCIA FORENSE

Abogados, investigadores y educadores han percibido el influjo de las populares series de televisión protagonizadas por la policía científica

Max M. Houck



La ciencia forense ha sido la columna vertebral de muchas historias de misterio, desde las aventuras de Auguste Dupin imaginadas por Edgar Allan Poe, o los relatos de Sherlock Holmes de Arthur Conan Doyle, hasta las actuales series de televisión protagonizadas por investigadores forenses. Los métodos de Holmes presagiaban muchas de las técnicas que hoy relacionan los indicios físicos con el autor de un crimen; es el caso de las pruebas de sangre. La ciencia forense se convirtió en una profesión específica a principios del siglo XX; a finales, con las pruebas de ADN, se hizo popular. Y hoy, las series centradas en la policía científica, muy en especial *CSI*, con sus variantes, tienen grandes audiencias.

Estos programas pueden hacer creer a los espectadores que los laboratorios forenses cuentan con los aparatos más avanzados y un abundante personal altamente cualificado que nada en recursos para concluir a tiempo y con éxito cada investigación. Sin embargo, esta percepción pública está muy lejos de la realidad. Hay quienes deploran un "efecto CSI": algunos abogados y jueces tienen la impresión de que los miembros de los jurados que siguen esas series empiezan a demandar en los juicios pruebas físicas poco razonables. A esto lo llaman "efecto CSI". Haya o no un tal efecto que repercuta de modo cuantificable en los tribunales, es indiscutible, sin embargo, la influencia que ese tipo de programas ejerce en las actividades de la policía, que ahora recopila más pruebas físicas que nunca. O en el mundo académico, cuya oferta de cursos de ciencia forense crece exponencialmente. O en los saturados laboratorios reales, que distan de parecerse a los palacios bañados en luz azul de la televisión.

BRAD SWONETZ

Las consecuencias en los tribunales

Uno de los episodios trataba de un equipo de televisión que filmaba las actividades ficticias de los protagonistas de la serie. El investigador jefe, Gil Grissom, renegando por tener tan cerca al equipo de televisión, dice: "Hay demasiados programas de policías científicos en la televisión". Muchos abogados y jueces que creen que los miembros del jurado padecen el efecto CSI deben de pensar lo mismo. Pero, ¿hasta qué punto CSI y programas similares influyen en las expectativas de los miembros del jurado?

La prensa comenzó a prestar atención a esa posibilidad en 2003, con anécdotas narradas por abogados y jueces que daban a entender que estaba cambiando la actitud de los jurados. En 2005, Josh Marquis, fiscal del distrito de Oregón y vicepresidente de la Asociación Nacional de Fiscales de Distrito, afirmó que ahora los jurados esperaban que se hiciese una prueba de ADN casi siempre, que se dispusiese de las técnicas más avanzadas y que se pareciesen a las que veían en televisión. En un juicio por asesinato celebrado en Los Angeles, el jurado se quejó de que a una chaqueta manchada de sangre no se le hubiese hecho el análisis de ADN, aun cuando era innecesario, pues el acusado había admitido que había estado en la escena del crimen. El juez comentó que los miembros del jurado habían aprendido en la televisión que se podían hacer pruebas de ADN, pero no sabían cuándo se debían aplicar. En un estudio llevado a cabo en Delaware sobre los jurados y su reacción ante las pruebas, figura el caso de un miembro de jurado que, confundido por unas dificultades con el ADN, se quejó de que ese tipo de cosas no pasaban en CSI.

En un juicio en Baltimore los abogados culparon al efecto CSI de que el jurado absolviera al acusado de asesinato: el testimonio de dos testigos oculares se desestimó por falta de pruebas físicas. Un abogado defensor, Joseph Levin, sostiene que en los últimos cinco años ha visto un gran cambio en los jurados, que ahora inquieren a menudo acerca de la falta de pruebas físicas. Desean saber dónde están las huellas dactilares o el ADN. Si no se cuenta con esos indicios, quieren sa-



1. LAS ESCASAS PRUEBAS FISICAS llevaron a la absolución del actor Robert Blake (*en la foto, besando a su abogado después del veredicto*), acusado del asesinato en 2001 de su esposa Bonny Lee Bakley, a pesar de que el móvil y las circunstancias lo culpaban. Su abogado sostiene en alto la pulsera electrónica del tobillo de Blake. En un juicio civil posterior, en cambio, se condenó a Blake a indemnizar a los cuatro hijos de su esposa por su muerte.



El efecto CSI: ¿inocente gracias a la televisión?

ber por qué. En el juicio del actor Robert Blake, acusado de asesinato, los fiscales intentaron convencer al jurado demostrando que el móvil y las circunstancias lo señalaban como culpable, y presentaron testigos que declararon que Blake les pidió que mataran a su esposa. Pero no se presentaron pruebas de residuos de disparos ni de salpicaduras de sangre, y Blake fue absuelto. Un miembro del jurado dijo en el juicio que, si el fiscal hubiera aportado ese tipo de información, entonces habrían tenido a Blake por culpable. Era el primer caso que ese fiscal perdía tras cincuenta juicios por asesinato.

Antes de que CSI gozara de tanto éxito, a los abogados les inquietaba que los miembros del jurado no entendieran la complejidad de las pruebas de ADN. Ahora, sin embargo, les preocupa que no entiendan la diferencia entre la realidad y la ficción; es común que los abogados pregunten a los futuros miembros del jurado si han visto muchos programas de televisión de tema forense; algunos fiscales intentan adelantarse a un potencial efecto CSI. En juicios celebrados en Arizona, Illinois y California se han llevado al estrado testimonios de "pruebas negativas" para demostrar al jurado que muchas veces la policía no encuentra pruebas físicas, se trate de ADN o de huellas digitales, en la escena del crimen.

Muchos expertos en derecho sostienen, sin embargo, que el efecto CSI puede ser ilusorio. El mismo periódico que recogía las opiniones de Levin señalaba también que el juez Albert Garofolo mantenía que, aunque la reacción inicial era la de creer en la existencia del efecto CSI, sería mejor pensar que se trataba de una mera sospecha. Pese a la impresión de que hay tal efecto, decía, no recordaba ninguna situación donde hubiera oído decir a un miembro del jurado que esperaba algo más.

Simon Cole, profesor del departamento de criminología, derecho y sociedad de la Universidad de California en Irvine, y su alumna Rachel Dioso escribieron en el *Wall Street Journal* en 2005: "Resulta verosímil que la televisión pueda tener un efecto en los tribunales... pero alegar que CSI y programas similares están aumentando el número de absoluciones es una afirmación asombrosa; hablando en términos forenses, no hay una sola prueba que lo sostenga. Existe un sólido campo de investigación sobre la toma de decisiones de los miembros de los jurados, pero ni un solo estudio ha descubierto efecto CSI alguno. Sólo hay indicios anecdóticos".

Kimberlianne Podlas, abogada y profesora asociada de Etica y Derecho de los Medios de Comunicación de la Universidad de Carolina del Norte en Greensboro, acaba de publicar la que parece ser la primera investigación sobre el efecto CSI. Llegó a la conclusión siguiente: la posibilidad de una absolución, y los razonamientos que pueden conducir a ello, eran los mismos entre los miembros de un jurado que veía regularmente CSI y los que no lo veían: no existía efecto CSI. No obstante, algunos entrevistados señalaron que la falta de pruebas forenses constituía un problema incluso cuando no eran determinantes para establecer la veracidad de los cargos. Se han recomendado estudios con miembros de jurados reales; al menos cinco doctorandos (tres en EE.UU. y dos en Inglaterra) están preparando sus tesis sobre el efecto CSI.

Resumen/Ciencia contra ficción

- Fiscales, jueces y policías han advertido de la posible existencia de un "efecto CSI": el éxito de series de televisión protagonizadas por policías científicos ha hecho que los jurados exijan más calidad y cantidad de pruebas físicas en los juicios.
- Todavía no está demostrado que exista el efecto CSI, pero las series de televisión han llevado a que se recopilen más pruebas, lo que crea problemas de almacenamiento y escasez de personal.
- La televisión ha fomentado el interés por la ciencia forense en la universidad. La matriculación en los correspondientes programas de estudio ha aumentado considerablemente desde que se emiten las series CSI.

¿Cuál es la realidad?

Se puede cuestionar la influencia de las series de televisión en las expectativas y decisiones de los miembros del jurado, pero no cabe duda de que la televisión ofrece al público una imagen distorsionada de la policía científica, de su manera de proceder, de lo que puede o no puede hacer. Los personajes de CSI constituyen una combinación de inspector de policía y científico forense, tareas que en el mundo real requieren estudios y métodos propios. Desde finales de los años ochenta rige la especialización dentro de los laboratorios forenses. Todo científico forense debe conocer los contenidos de otras subdisciplinas, pero ninguno domina todos los aspectos de la investigación en la escena del crimen.

Los laboratorios no suelen realizar todo tipo de análisis, ya sea por su coste, por falta de recursos o por no haber demanda suficiente. Además, los programas de televisión retratan erróneamente a los científicos forenses como si tuvieran tiempo suficiente para investigar cada caso por separado. En la ficción, varios inspectores, técnicos y científicos dedican todo su tiempo a una sola investigación; en la vida real, cada científico investiga varios casos a la vez.

Los programas de ficción sobre la policía científica se alejan también del mundo real en la presentación de las técnicas científicas. Thomas Mauriello, de la Universidad de Maryland, estima que alrededor del 40 por ciento de la ciencia forense que aparece en CSI no existe. Carol Henderson, de la Universidad de Stetson, reconoce que los miembros del jurado se sienten a veces decepcionados ante el "olvido" de nuevas técnicas que creen que existen.

Tampoco pueden ser los investigadores reales tan precisos como sus homólogos en la pantalla. Al encontrar una prueba, un personaje televisivo la analizaría con un instrumento de pantalla brillante y luces intermitentes y concluiría: "Lápiz de labios Maybelline, Color 42, Serie A-439". El mismo personaje interrogaría entonces a un testigo, al que le diría que sabía que la víctima había estado con él porque se había identificado el lápiz de labios que usaba en el cuello de su camisa. En la vida real, las respuestas casi nunca son tan contundentes ni es probable que la policía científica se encuentre cara a cara con el acusado. Esta disparidad entre la ficción y la realidad puede acarrear consecuencias curiosas: un policía de Knoxville notificó que la víctima de un robo de coche, al ver restos de fibra roja en el asiento de atrás, le dijo que quería que la analizara para identificar de dónde provenía, en qué tienda se había comprado y la tarjeta de crédito con que la habían pagado.

Agobiados de trabajo

A pesar de no contar con todas las herramientas que aparecen en CSI, los científicos forenses disponen de técnicas cada vez más refinadas. Los métodos iniciales de análisis de ADN de finales de los años ochenta requerían muestras del tamaño de una moneda de dos céntimos de euro; los métodos actuales analizan nanogramos. Los noticiarios informan rutinariamente sobre casos antiguos que se han resuelto ahora, personas descartadas como sospechosas o descubrimientos de condenas erróneas, todo ello gracias a la avanzada técnica forense. Las bases de datos de ADN, de huellas dactilares y de municiones resultan fundamentales para relacionar al delincuente con el delito.

Los investigadores policiales en el lugar del crimen van percibiendo las ventajas que les reporta la ciencia; por otra parte, sienten que se espera que recopilen más pruebas físicas. Ambas razones mueven a que se multiplique el material a analizar. Cuando antes se recogían cinco pruebas en la escena de un crimen, hoy se toman entre 50 y 400. No es necesario recoger y analizar cada posible prueba encontrada en la escena del crimen. Hay que sopesar la remota posibilidad de que un objeto sea relevante con la existencia de muchos casos atrasados. Pero la televisión ha creado expectativas no realistas que se han traducido en presiones sociales, profesionales y políticas; si un policía encuentra una bolsa llena de colillas, envoltorios de comida rápida y otros restos de basura, hay muchas posibilidades de que se lleven esos objetos a analizar.

En muchos casos, toda esta labor tendrá que realizarla un personal ya sobrecargado de trabajo. Por ejemplo, en el estado de Massachusetts viven, sin contar Boston, 6.300.000 personas; para ellas, sólo hay 8 analistas de ADN (para Boston hay tres). La ciudad de Nueva York tiene 8 millones de habitantes y 80 analistas de ADN. Pero Massachusetts y la ciudad de Nueva York tienen similares índices de delitos violentos (469,4 y 483,3 cada 100.000 habitantes, respectivamente), tipo de delito que suele requerir análisis de ADN. Ante esa escasez, se ha autorizado la contratación de más analistas forenses de ADN para Massachusetts.

Las nuevas tendencias han venido a agravar el ya inquietante problema de la acumulación de trabajo. Un

¿Quién va a analizar todas esas pruebas?



2. ALMACENAR Y CONSERVAR millones de pruebas plantea grandes dificultades a los cuerpos encargados del cumplimiento de la ley y a los laboratorios forenses.

CORTESIA DEL LABORATORIO DE LA POLICIA ESTATAL DE WASHINGTON

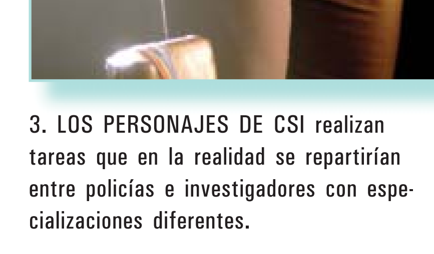








Los investigadores ficticios



3. LOS PERSONAJES DE CSI realizan tareas que en la realidad se repartirían entre policías e investigadores con especializaciones diferentes.

GIORGIO BENVENUTI *EPA/Corbis (escena del crimen)*; JEFF SINER *Corbis/Sygma (balística)*; SIMON KWONG *REUTERS/CORBIS (inserto balística)*; CBS/EVERETT COLLECTION *(Marg Helgenberger)*

estudio publicado recientemente por la Oficina de Estadísticas Judiciales del Departamento de Justicia de Estados Unidos descubría que a finales de 2002 (últimos datos disponibles) había más de medio millón de casos atrasados en los laboratorios de la policía científica, pese a que el porcentaje de pruebas que se concluyen de manera satisfactoria supera un noventa por ciento, o más, del esperado. Para conseguir un tiempo de respuesta de 30 días para los pedidos de ese año, el estudio estimó que se necesitarían otros 1900 empleados a tiempo completo. Otro estudio del Ministerio de Justicia demostró que los principales 50 laboratorios forenses del país recibieron más de 1,2 millones de solicitudes de servicios en 2002; la acumulación de casos en estos laboratorios se ha doblado en el curso de un año. Y todo esto a pesar de que los índices de delincuencia han disminuido desde 1994.

La recogida de más pruebas físicas requiere su almacenamiento durante un determinado período de tiempo, que dependerá de las leyes locales, estatales o federales. El almacenamiento obliga a disponer de ordenadores, programas informáticos y personal que se haga cargo de la conservación de las pruebas, así como de instalaciones adecuadas para guardar las pruebas biológicas, el ADN por ejemplo, y espacio para el resto de pruebas físicas. En muchas jurisdicciones, pasado un tiempo las pruebas se pueden destruir o devolver. El almacenamiento es una cuestión delicada cuando se trata de casos antiguos o estancados: el Proyecto Inocencia, de la facultad de derecho Benjamin N. Cardozo de Nueva York, se encuentra con que en el 75 por ciento de las condenas quizás injustas que investiga no se disponga ya de las pruebas.

El mero hecho de hallar las pruebas almacenadas constituye un problema: un estudio llevado a cabo en 2003 por la Sociedad Norteamericana de Directores de Laboratorios Criminológicos indicaba que más de una cuarta parte de los laboratorios forenses estadounidenses no contaba con los ordenadores necesarios para la localización de las pruebas almacenadas. Mark Dale, director del Instituto Forense Regional de Northeast, estima que se necesitarían otros 10.000 forenses durante la próxima década para solucionar estas carencias. Además, llevar a cabo una modernización apropiada de las instalaciones costaría 1300 millones de dólares, y adquirir nueva instrumentación, más de 285.

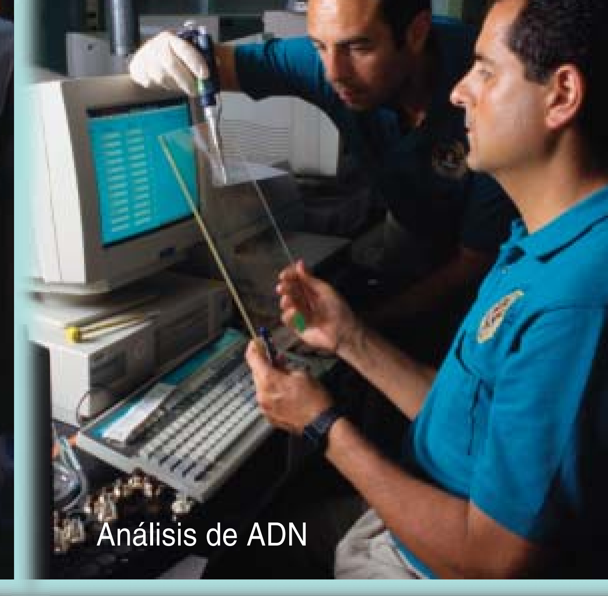
El efecto CSI en la Universidad

Si nos fijamos en el lado positivo, gracias a CSI y a programas similares el público siente una fascinación y respeto por la ciencia, que le lleva a considerarla una profesión emocionante e importante, algo nunca visto desde el programa espacial Apolo. Las solicitudes de matriculación en cursos de ciencia forense se están disparando en EE.UU. En la Universidad de Virginia Occidental, donde yo trabajo, la carrera de investigación policial y forense ha pasado de cuatro licenciados en el año 2000 a ser actualmente la tercera especialidad más elegida de la Universidad, con más de 500 alumnos matriculados.

La expansión de los cursos ya existentes y la creación de otros nuevos ha sido tal, que el Instituto Nacional de Justicia, en colaboración con la Universidad de Virginia Occidental, elaboró un informe que sentaba las bases para la constitución de una comisión de acreditación dependiente de la Academia Norteamericana de Ciencias Forenses. A fecha de hoy, 11 programas educativos disponen ya de acreditación provisional, condicional o completa.







son expertos en múltiples especialidades.

La popularidad de CSI puede haber afectado la composición humana de la policía científica. En los años noventa, mujeres y minorías tenían poco peso en las series de televisión de tema científico; este aspecto ha mejorado en CSI. Actualmente las mujeres son mayoría en los programas universitarios de ciencia forense de EE.UU. y muchas ejercen ya la profesión. Dos terceras partes de los directivos de laboratorios forenses son varones; este porcentaje seguramente decrecerá con la incorporación creciente de la mujer.

Lo importante de este nuevo interés público en la policía científica, sin embargo, sería que se dotase a la investigación forense de más medios. En el pasado, la mayor parte de la investigación se hacía en laboratorios policiales y se refería a cuestiones específicas de los casos. Mas para que estas técnicas avancen, hay que investigar en un medio controlado, en un laboratorio académico, único lugar donde se puede profundizar en cuestiones que lo necesitan. Los tribunales han puesto últimamente en cuestión la antigua premisa de la absoluta individualidad de las huellas dactilares, las marcas que dejan las herramientas, las señales de mordiscos, las estriaciones de las balas y la caligrafía.

Si cada vez nos fiamos más de la ciencia forense, ésta deberá, por su parte, alcanzar mayor solvencia. Según un informe reciente del Instituto Nacional de Justicia presentado ante el Congreso de los Estados Unidos, se necesita investigación básica para fundamentar científicamente el análisis de las marcas dejadas por neumáticos o pisadas, la autentificación de documentos y el examen de armas y las señales que imprimen las herramientas. El informe recomienda también que el gobierno federal acometa una investigación para validar las disciplinas forenses, que estudie los principios básicos, las tasas de error y la calidad del procedimiento. A todas luces, sería beneficioso contar con más fondos para este tipo de investigación; sin embargo, EE.UU. gastó este año apenas 7 millones de dólares en investigación básica forense, mientras que el Instituto Nacional de la Salud dedicó 123 millones a la medicina alternativa.

Una de las obligaciones fundamentales de cualquier gobierno democrático es garantizar la seguridad pública de una manera justa. La ciencia forense forma parte integral y esencial de los procesos criminales. Para cumplir con esta obligación en el siglo XXI hay que contar con laboratorios forenses bien equipados, atendidos por un personal con la preparación adecuada. El interés popular por la policía científica ha alcanzado niveles sin precedentes y exige resultados veraces. Dejando fuera incluso de los tribunales el efecto CSI se percibe la necesidad de fomentar la investigación forense y mejorar los laboratorios donde se efectúa.

MATT YORK AP PHOTOS (*interrogatorio*); STEVE LISS *Corbis/Sygma* (*química*); ANNA CLOPET *Corbis* (*análisis de ADN*)

El autor

Max M. Houck es director del programa Iniciativa Forense de la Universidad de Virginia Occidental para el desarrollo de la investigación y las prácticas profesionales. Es antropólogo y experto en localización de pruebas; dirigió la Unidad de Localización de Pruebas del laboratorio del FBI de 1992 a 2001. Forma parte de los consejos editoriales del *Journal of Forensic Sciences* y del *Journal of Forensic Identification,* de la Academia Americana de Ciencias Forenses, de la Sociedad Norteamericana de Directores de Laboratorios Criminales y de la Asociación Internacional para la Identificación.

Bibliografía complementaria

THE CSI EFFECT: FAKE TV AND ITS IMPACT ON JURORS IN CRIMINAL CASES. Karin H. Cather en *Prosecutor*, vol. 38, n.º 2; marzo-abril 2004.

PUBLIC FORENSIC LABORATORY BUDGET ISSUES. Perry M. Koussiafes en *Forensic Science Communications*, vol. 6, n.º 3; julio 2004.

TRACE EVIDENCE ANALYSIS: MORE CASES IN MUTE WITNESSES. Max M. Houck. Elsevier/Academic Press, 2004.

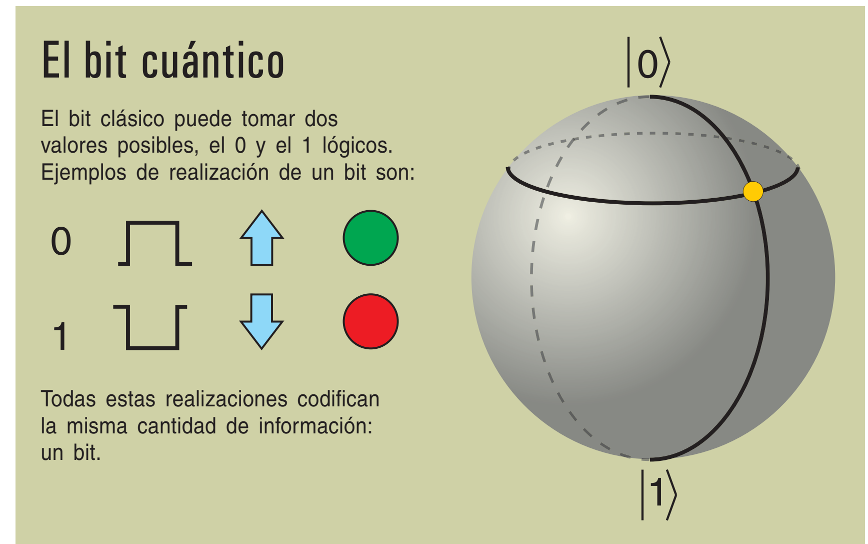
FUNDAMENTALS OF FORENSIC SCIENCE. Max M. Houck y Jay A. Siegel. Elsevier/Academic Press, 2006.

Procesamiento cuántico de la información

La mecánica cuántica ofrece nuevas formas de procesamiento y transmisión de información. Para llevar a cabo cualquiera de estas aplicaciones, se debe combatir la decoherencia, el ruido que degrada las propiedades cuánticas de todo sistema

Antonio Acín

Supongamos que se almacena información en el estado de un átomo o de un fotón de luz, partículas cuyo comportamiento se rige por las leyes de la mecánica cuántica. ¿Implica algún cambio en el procesamiento y transmisión de la información? En los últimos años, una nueva disciplina científica pretende dar respuesta a esa pregunta: la teoría de la información cuántica. Ha emergido de la combinación de diferentes aspectos de la física teórica y aplicada con la teoría de la información y la computación. Se propone analizar qué posibilidades le ofrecen las leyes de la mecánica cuántica al procesamiento y a la transmisión de información. Gracias a este enfoque, se han encontrado espectaculares aplicaciones (como la criptografía cuántica o la teleportación cuántica) que desafían la comprensión *clásica* de la realidad. Nuestra intuición sólo está acostumbrada a razonar según dicta el entorno, donde los efectos cuánticos son imperceptibles y la mecánica clásica (o newtoniana) ofrece una descripción satisfactoria de los fenómenos que se observan. Por ejemplo, nadie se ha encontrado nunca delante del famoso gato de Schrödinger, vivo y muerto al mismo tiempo. Por ello, una de las primeras recetas que hay que seguir a la hora de afrontar y analizar las nuevas propuestas de la teoría de la información cuántica consiste en abstenerse de buscarles explicaciones *clásicas*. Se debe realizar un esfuerzo intelectual y acostumbrarse a pensar de un modo *cuántico*, aceptando e intentando explotar al máximo las nuevas reglas de juego que este formalismo nos ofrece. En mi opinión, si la teoría de la información cuántica parece un campo apasionante y siempre sorprendente, es porque nos "obliga" a renunciar a la intuición.



EL BIT CUANTICO O QUBIT se puede representar como un punto en la llamada esfera de Poincaré. Los polos se asocian con los estados |0⟩ y |1⟩. Cualquier superposición de estos dos estados genera un punto en la esfera, único. Por tanto, el valor del bit cuántico se puede especificar por medio de dos ángulos, la longitud y la latitud.

ANTONIO ACIN

Históricamente, la mecánica cuántica fue la respuesta a una serie de problemas que aparecieron a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, cuando la física experimental permitió la observación de fenómenos a escala atómica. Surgieron entonces nuevas preguntas que requirieron nuevas respuestas, y éstas llevaron de manera más o menos natural a la mecánica cuántica tal y como hoy la concebimos. Hacia finales de los años treinta, se había elaborado la mayor parte de la formulación teórica de la mecánica cuántica. ¿Por qué, pues, tardaron alrededor de medio siglo en aparecer los primeros resultados relativos a la información? Una primera y sencilla razón es que en aquella época no existía una formulación de la teoría de la información. Los trabajos de Shannon que establecieron las bases de la teoría de la información datan de 1949. Esta simple respuesta justifica en parte el retraso entre la finalización del desarrollo teórico de la mecánica cuántica y el nacimiento de la información cuántica. Pero no es suficiente para explicar las razones por las cuales no se pensó en la posible aplicación de las leyes cuánticas al procesamiento de la información hasta principios de los años ochenta.

A partir de entonces diversos investigadores empiezan a plantearse la siguiente situación: si el progreso técnico de los dispositivos de transmisión y procesamiento de la información prosigue en su tendencia actual, se alcanzará la escala atómica en un tiempo razonable. Para representar esta evolución se recurre a la ley de Moore. En 1965, Gordon Moore observó un comportamiento exponencial en el cambio a lo largo del tiempo del número de transistores por circuito integrado y predijo que esta tendencia continuaría.

La predicción de Moore ha venido cumpliéndose hasta el día de hoy con sorprendente exactitud. Suponiendo que esta tendencia siga manteniéndose, ¡la ley muestra que la información se codificará en átomos hacia el año 2030! Parecerá demasiado optimista, pero es una indicación razonable de que la técnica alcanzará pronto el mundo microscópico, donde las leyes cuánticas gobiernan el comportamiento de los dispositivos físicos. Por lo tanto, hay que analizar el grado en que estos efectos modificarán la manera de transmitir y procesar la información. Una primera opción habría sido conservadora: evitar que las peculiaridades cuánticas modificasen los resultados ya establecidos. La opción escogida por los investigadores de la teoría de la información cuántica fue más ambiciosa: explotar las posibilidades que ofrecerá el futuro entorno cuántico para diseñar nuevas aplicaciones.

¿Por qué decimos que la información es cuántica o clásica?

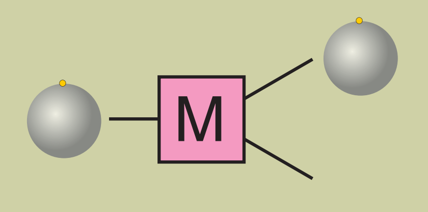
Uno de los resultados teóricos más espectaculares del nuevo campo de la teoría de la información cuántica es el algoritmo cuántico de Shor para la factorización en números primos. Es decir, dado un número inicial *N*, ¿podemos encontrar dos números primos tales que su producto sea *N*? La respuesta no entraña especial dificultad si *N* consta de un número modesto de dígitos, pero el problema se complica mucho cuando es grande, tanto, que no existe en la actualidad un algoritmo eficiente para resolverlo. Estamos por lo tanto ante un problema complejo.

En 1994, Peter Shor propuso un algoritmo de factorización eficiente que se servía de las nuevas posibilidades ofrecidas por las leyes de la mecánica cuántica. Para hacerse una idea de la diferencia entre los dos modos de procesar, imaginemos que debe factorizarse un número de 300 dígitos. El mejor algoritmo clásico requeriría alrededor de 10^{24} pasos, mientras que el algoritmo cuántico de Shor necesitaría sólo 10^{10}. Pese a la aparente artificialidad del problema de la factorización, sobre él reposan gran parte de los métodos actuales de encriptación de información. Por lo tanto, un espía dotado de un ordenador cuántico —algo impensable con la técnica actual— podría leer muchas de las comunicaciones secretas de hoy en día.

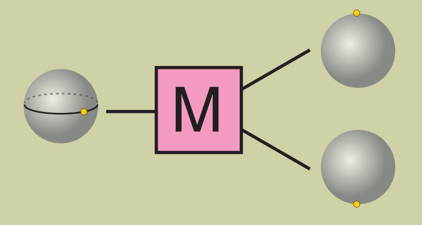
Recuerdo que en una ocasión Rolf Tarrach, de la Universidad de Barcelona, contó que había impartido un seminario ante matemáticos acerca de este algoritmo. Reaccionaron con bastante escepticismo; estaban imbuidos de la formulación clásica de la información, donde no existe ningún método de factorización eficiente. He encontrado reacciones similares al intentar explicar la criptografía cuántica a expertos en criptografía clásica. En ciertas ocasiones me ha parecido observar en sus caras la sensación de que yo estuviera haciendo "trampas" al adoptar unas reglas que no se ajustaban a la teoría de la información matemática por ellos conocida. ¡Y, por supuesto, tienen razón! Suele creerse que la teoría de la información es abstracta y matemática

Las paradojas cuánticas

El proceso de medición puede modificar el estado de un sistema. Aun habiendo preparado el sistema en un estado conocido, existen situaciones experimentales para las cuales sólo podemos dar la descripción en términos probabilísticos.

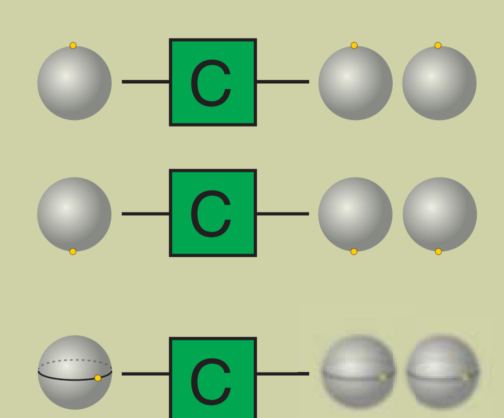


Si se prepara un estado en uno de los polos de la esfera de Poincaré y se mide según esa misma dirección, sólo un resultado es posible y la medida no afecta al sistema.



Si se prepara el bit cuántico en el ecuador de la esfera y se aplica la misma medida, se tienen dos resultados con igual probabilidad, y el estado inicial se ve modificado.

Teorema de la no-clonación: no existe una máquina capaz de clonar de manera perfecta todos los estados de un bit cuántico.



Es posible diseñar una operación cuántica que clone de manera perfecta los dos polos de la esfera de Poincaré. La misma máquina copia de manera imperfecta, con errores, estados en el ecuador de la esfera.

ANTONIO ACIN

y está firmemente establecida. Sin embargo, al codificar la información en dispositivos físicos distintos, se tienen diferentes posibilidades y limitaciones. Como dijo Rolf Landauer, de IBM, "information is physical" (la información es un ente físico). Hablaremos, pues, de información cuántica o clásica, de bits clásicos o cuánticos, dependiendo de los dispositivos físicos con que se codifique la información. Las reglas de juego, y las posibilidades que ofrecen, cambiarán según la situación.

La coherencia cuántica: bit cuántico y entrelazamiento

La unidad básica en la teoría clásica de la información es el bit, que puede tomar dos valores: 0 y 1. Un pulso de luz o un interruptor codifican de manera sencilla un bit. Por supuesto, existen infinitos modos de codificar un bit clásico mediante un dispositivo físico; desde el punto de vista de la información clásica que poseen, todas son equivalentes.

Supongamos ahora que el bit se codifica en un sistema cuántico que puede tomar dos estados, $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Un postulado básico de la mecánica cuántica establece que, si un sistema cuántico puede tomar dos valores distintos, también podrá tomar cualquier superposición coherente de ellos. Por ejemplo, el sistema podrá hallarse en el estado resultado de la combinación de $|0\rangle$ y $|1\rangle$ con los mismos pesos. Debe resaltarse que esta superposición es coherente; es decir, el caso anterior no equivale a declarar que el estado del sistema es igual a $|0\rangle$ o $|1\rangle$ con probabilidad un medio, sino que es mitad $|0\rangle$ y mitad $|1\rangle$, ¡al mismo tiempo! Pero ésta no es más que una de las posibles superposiciones que se pueden tener de $|0\rangle$ o $|1\rangle$. De hecho, se pueden crear múltiples combinaciones: es infinito el número de estados accesibles. Por lo tanto, el bit cuántico (o qubit), la unidad básica de información cuántica, puede ser $|0\rangle$, $|1\rangle$ o cualquier combinación de tales estados en grados distintos. Para representar gráficamente esta riqueza se acude a la esfera de Poincaré (*véase el recuadro* El bit cuántico). En esa imagen, cada bit cuántico se corresponde con un punto de la superficie de la esfera. Se puede entender la sorpresa del lector no acostumbrado al formalismo cuántico ante los estados de superposición. En nuestro entorno no existen pulsos de luz que se hallen en una superposición de apagado y encendido (o gatos vivos y muertos). Pero debemos hacer un esfuerzo y aceptar las nuevas reglas de juego, que por otra parte han sido verificadas por multitud de experimentos.

Físicamente, un bit cuántico suele realizarse con el espín de un átomo o la polarización de un fotón. Como sucede en el caso del bit clásico, todas estas operaciones son equivalentes desde el punto de vista de la información cuántica que poseen.

Consideremos ahora un caso ligeramente más complicado, con dos bits cuánticos. Dos posibles estados del sistema serán $|00\rangle$ y $|11\rangle$. Pero del mismo modo que antes, otro estado posible será la superposición coherente de $|00\rangle$ y $|11\rangle$. En este caso, no podremos especificar las propiedades individuales de cada qubit, sino que sólo cabrá dar las propiedades de los dos bits como entidad global. Los dos bits se encuentran en un estado entrelazado, en el cual las propiedades de uno se ligan, o correlacionan, fuertemente con las del otro. Este tipo de correlaciones entre partículas cuánticas escapa a cualquier explicación clásica y constituye una de las propiedades clave de la mayoría de las aplicaciones de teoría de la información cuántica. El entrelazamiento (en inglés, *entanglement*) es un recurso básico de la información cuántica. Su importancia es capital. Como

hemos visto, el entrelazamiento no es más que una consecuencia de la posibilidad de tener superposiciones coherentes de estados en un sistema de más de una partícula.

¿Por qué nuestro entorno no es cuántico?

Hacerse una idea intuitiva de qué significa una superposición coherente de estados resulta complicado. No tenemos nada a nuestro alrededor que presente esas propiedades; efectos de ese tipo se manifiestan experimentalmente sólo cuando se desciende a la escala microscópica. Cabe preguntarse, pues, por el motivo de que las propiedades cuánticas no aparezcan a escala macroscópica y por la naturaleza de la transición entre las descripciones clásica y cuántica de la realidad.

Los sistemas macroscópicos, compuestos de un gran número de partículas, son complejos. Se produce en ellos una gran cantidad de interacciones. Aislar completamente un sistema dado es difícil. Se deben controlar tantos grados de libertad, que resulta muy complicado impedir que el sistema no interactúe con su entorno. Este proceso indeseado de interacción afecta profundamente a las propiedades cuánticas de un sistema. Los estados de superposición se transforman y pierden su coherencia. Así, un estado que sea la superposición coherente de $|0\rangle$ y $|1\rangle$ se convierte en una superposición incoherente de $|0\rangle$ y $|1\rangle$. En este caso obtenemos una descripción del sistema a la que estamos acostumbrados: su estado es $|0\rangle$ o $|1\rangle$ con probabilidad un medio. Debe tenerse muy en cuenta la irreversibilidad de este proceso. Sólo se podría recuperar la coherencia a partir del entorno. Pero, al no controlarse la interacción con éste, no hay forma de deshacer los cambios y devolver el sistema cuántico a su estado inicial.

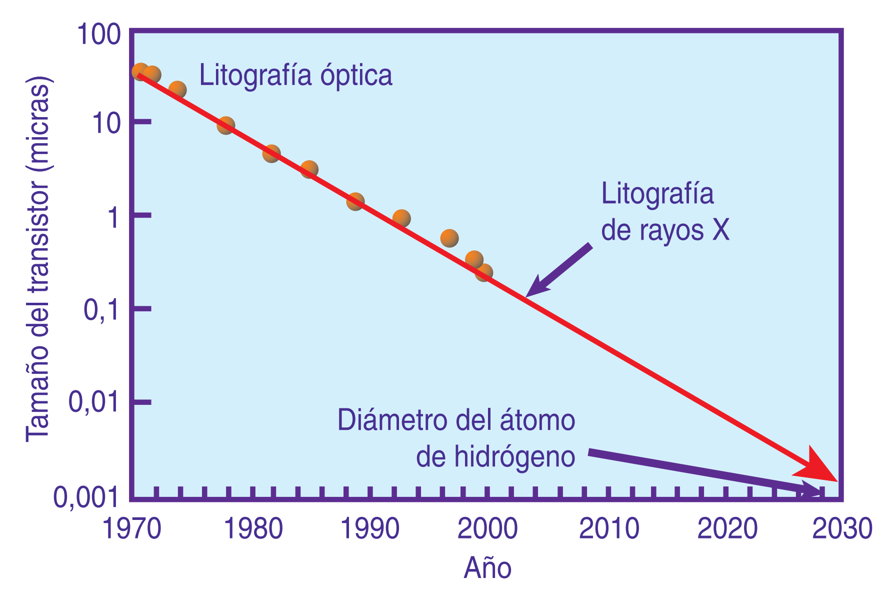
La interacción indeseada con el entorno causa, pues, la decoherencia, o pérdida de coherencia, de un sistema cuántico. En situaciones de alta decoherencia no es posible mantener estados de superposición; sus propiedades de coherencia se pierden rápidamente. Ello implica que el bit cuántico no tendrá a su disposición todas las posibilidades de la esfera de Poincaré; toda esa riqueza, la perderemos. Del mismo modo, no habrá estados entrelazados, superposiciones coherentes de $|00\rangle$ y $|11\rangle$, de importancia capital en la teoría de la información cuántica.

La decoherencia, en resumidas cuentas, hace que los dispositivos que almacenan y codifican la información pierdan sus propiedades cuánticas. Se vuelve entonces a la situación habitual hasta hace poco: la descripción de los dispositivos corresponde a la mecánica clásica (*véase el recuadro* "Superposiciones coherentes"). Todo procesamiento efectuado con ellos conducirá a los conocidos resultados de la teoría clásica de la información. Ninguna de las nuevas aplicaciones que aporta la teoría de la información cuántica podrá llevarse a cabo en situaciones de fuerte decoherencia.

Las paradojas cuánticas

Los estados de superposición y el entrelazamiento son fenómenos cuánticos, sin análogo clásico. Constituyen un ejemplo de lo que a veces se denominan "paradojas cuánticas", resultados del formalismo cuántico que escapan a nuestra intuición. Hay otras "paradojas cuánticas"; por ejemplo, que el proceso de medición de un sistema cuántico modifique el propio sistema o que, por mucho que se prepare un sistema cuántico de una manera perfectamente controlada, haya situaciones experimentales para las cuales sólo se podrá dar una respuesta probabilista (recordemos el "Dios no juega a los dados" de Albert Einstein). Menos conocido, pero fundamental en teoría de la información cuántica, es el teorema de la imposibilidad de la clonación. De acuerdo con el mismo, no existe una operación capaz de producir una copia idéntica de cualquier estado cuántico. Se podría diseñar, por ejemplo, una máquina que clonase los dos polos de la esfera de Poincaré, pero las copias de los estados que caen en el ecuador producidas por esa misma máquina serían imperfectas (*véase el recuadro* "Las paradojas cuánticas").

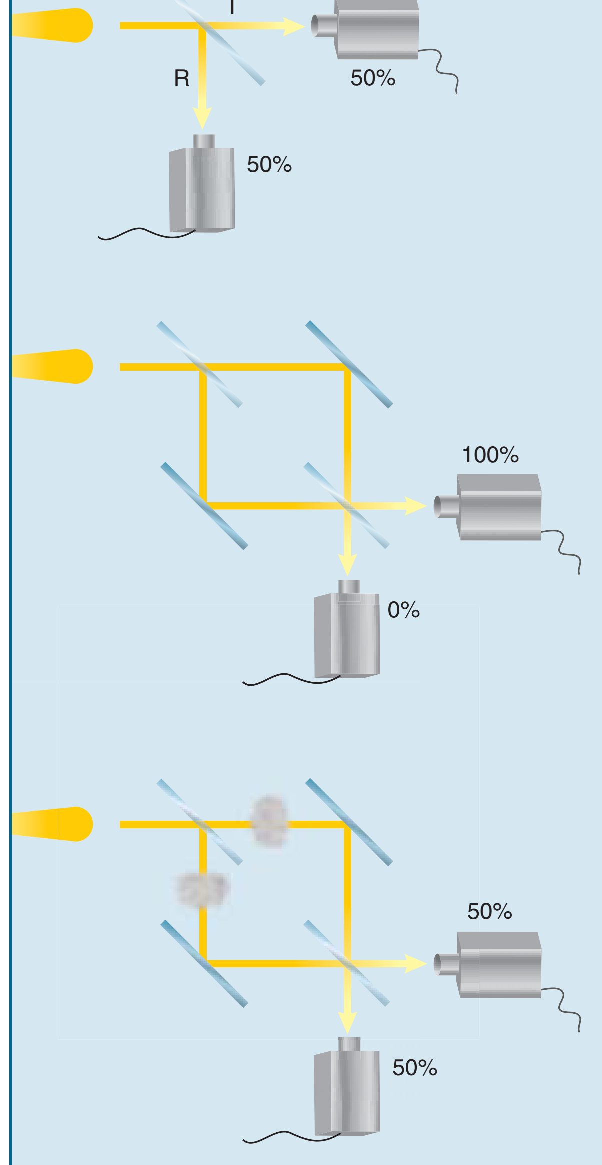
Hasta hace poco, la actitud común entre los físicos ante estos principios ha sido la de mirar hacia otro lado. Comparados con el enorme éxito de la mecánica cuántica a la hora de predecir los datos experimentales, estos resultados se han presentado con un halo negativo, que hay que aceptar y asumir, y para los que, "desgraciadamente", no existe alternativa. El enfoque de la teoría de la información cuántica es el opuesto: no sólo hay



1. EN 1965, Gordon Moore, cofundador de Intel, observó un aumento exponencial con el tiempo del número de transistores por circuito integrado y predijo que este comportamiento se mantendría. En la actualidad, la "ley" de Moore ha venido cumpliéndose, de tal manera que cada 18 meses ese número se multiplica por dos. Ello implica que el tamaño de los dispositivos físicos que almacenan la información decrece de un modo exponencial. Asumiendo que esta tendencia se mantenga, se alcanzarán las escalas microscópicas, donde los efectos cuánticos son relevantes, hacia el año 2030.

ANTONIO ACIN

Superposiciones coherentes



1 Un fotón de luz incide sobre un espejo semitransparente, que transmite la luz con probabilidad 1/2.El fotón resultante se encuentra en un estado que llamaremos “superposición coherente” de fotón transmitido (es decir, que toma el camino T) y reflejado (que toma el camino R). Vamos a ver qué se quiere decir con esto.
Si colocamos dos detectores y repetimos el experimento N veces, cada uno de los detectores medirá el fotón N/2 veces. Hasta aquí, los resultados de las medidas pueden ser también explicarse si se supone que el fotón se encuentra en una superposición “incoherente” de transmitido o reflejado, es decir, que el fotón toma uno de los dos caminos el 50% de las veces y el otro el 50% restante.

2 Supongamos que el fotón a la salida del primer espejo se encontrara en una superposición probabilística clásica, esa que hemos llamado incoherente, de T y R. Al combinar los dos caminos con espejos totalmente reflectantes sobre un segundo espejo semitransparente, se esperaría encontrar el fotón en cada uno de los detectores con probabilidad 1/2. Sin embargo, ¡existen configuraciones en las que sólo uno de los detectores mide el fotón! Es así porque las dos posibilidades se interfieren de manera constructiva para uno de los detectores, y destructiva para el otro. Por lo tanto, el estado del fotón a la salida del primer espejo no puede ser una mera combinación de T o R con probabilidad 1/2, sino que es una superposición coherente de fotón transmitido y reflejado.

3 Finalmente, supongamos que el fotón a la salida del primer espejo se ve afectado por decoherencia, o interacción incontrolada con el entorno. El estado pierde la coherencia y se transforma en una superposición incoherente de fotón transmitido o reflejado. Como consecuencia de este proceso, al repetir el montaje anterior el fotón puede encontrarse con igual probabilidad en cualquiera de los dos detectores. La interferencia constructiva/destructiva que se observaba anteriormente se ha perdido. Ahora, es de nuevo posible ofrecer una explicación del experimento suponiendo que el fotón toma cualquiera de los dos caminos posibles con igual probabilidad.

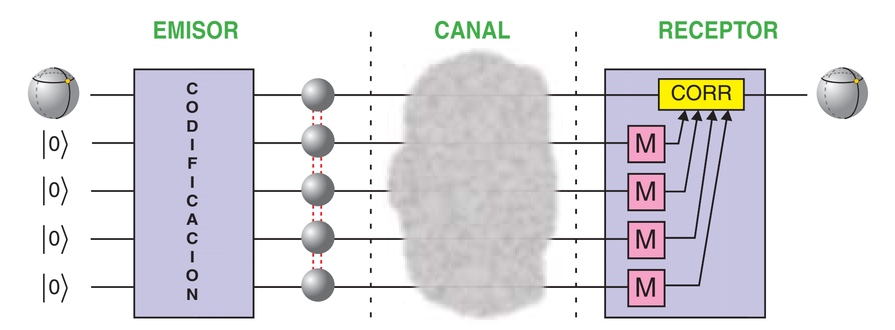
ANTONIO ACIN

que aceptar estas paradojas, sino utilizarlas para nuestro provecho. Nos encontramos ante situaciones sin un paralelo clásico. Por lo tanto, encierran la posibilidad de dar lugar a nuevas formas de procesamiento de información. En opinión de Nicolas Gisin, de la Universidad de Ginebra, un ejemplo claro de ello es la criptografía cuántica. La medición modifica el sistema. Supongamos que un emisor envía información a un receptor codificada en un estado cuántico y que una tercera persona intenta leerla sin autorización. El efecto que esa medición causará en el estado cuántico enviado producirá errores en la transmisión. Las partes autorizadas podrán entonces detectar la presencia del espía y detener la comunicación insegura. Esta es la idea general detrás de cualquier protocolo de criptografía cuántica. Como vemos, no presenta demasiada complejidad, una vez se tienen nociones básicas de mecánica cuántica, pero sí presupone un cambio de enfoque.

Podríamos, por tanto, afirmar que, desde el punto de vista de la información cuántica, “cuanto más cuántico, mejor”. Pero los efectos cuánticos de que estamos hablando aquí son imperceptibles en situaciones de gran decoherencia. Esta aparece, pues, como el enemigo del procesamiento de información en estados cuánticos. Si las condiciones experimentales no permiten una interacción controlada con el entorno, la descripción puede realizarse por medio de la mecánica clásica; no cabe esperar entonces ninguna mejora respecto a la teoría ya conocida. Es evidente que desde un punto de vista práctico es imposible contar con un sistema perfectamente aislado. El mismo proceso de observación de un sistema, la “lectura” de la información, implica una interacción

con el entorno, en este caso el observador. Por lo tanto, la única solución consiste en garantizar unos niveles de decoherencia bajos y con un grado de control aceptable, y, luego, dar con un modo de procesar la información ante este tipo de situaciones. Hay que aprender a procesar y transmitir información cuántica en entornos reales con modesta decoherencia.

Detengámonos en dos de las mejores soluciones del problema: la corrección cuántica de errores y la destilación de entrelazamiento. Estas técnicas persiguen proteger la información cuántica del ruido, es decir, de las interacciones no deseadas con el entorno.



2. PARA CORREGIR ERRORES, el emisor que recibe el qubit que debe transmitirse prepara cuatro estados (cuatro bits) extra. La información se codifica en un estado entrelazado de los cinco bits cuánticos, que se envían a través del canal. Al propagarse por el canal ruidoso, esos bits cuánticos sufren decoherencia, lo que se traduce en errores. El receptor realiza medidas (M) sobre cuatro de los qubits, cuyos resultados le dan información del error que se ha producido en el canal. Esto le permite corregir (CORR) el quinto qubit y recuperar el estado de partida.

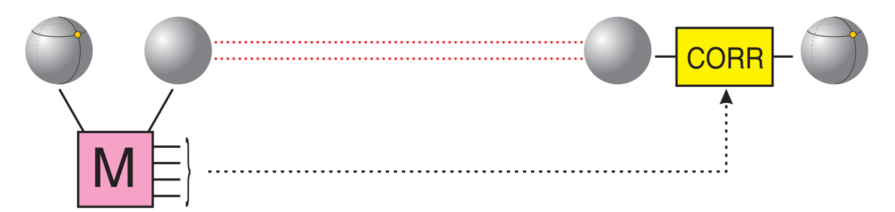
Corrección cuántica de errores

Una posible solución para combatir la decoherencia consiste en la corrección cuántica de errores. Si bien cabe ver en este método la traducción a un entorno cuántico de los protocolos clásicos de corrección de errores, éstos deben acomodarse a las nuevas propiedades cuánticas. Las soluciones deben ser más imaginativas de lo esperado a priori.

Las técnicas de corrección de errores pueden aplicarse a cualquier proceso donde se necesite un procesamiento cuántico de información que resista bien la decoherencia. Sin embargo, en aras de la simplificación e inteligibilidad, el análisis se hará para una situación de comunicación cuántica donde un emisor tiene que enviar información, codificada en un estado cuántico, a través de un canal con ruido. Supongamos que el emisor codifica un bit cuántico en la polarización de un fotón, que envía por una fibra óptica. Al propagarse por la fibra, el fotón interacciona con el material, con las moléculas que la componen; se producen efectos de decoherencia. El estado cuántico que el receptor capta es un estado ruidoso que conserva parte de la información enviada por el emisor. ¿Cómo se reconstruye la información original sin errores (es decir, con una probabilidad de error tan pequeña como se requiera)?

En este punto, vale la pena adelantar algunas ideas generales acerca del funcionamiento de los métodos de corrección de errores clásicos. Supongamos que se codifica un bit clásico en un pulso de luz que tomará dos valores, el 0 y 1 lógicos. En su propagación a través del canal, el pulso puede sufrir errores y lo que era un 0 convertirse en 1, y viceversa. Denotaremos por e la probabilidad de tener un error; la llamaremos tasa de error. Siempre podemos tomar e menor que un medio: si la probabilidad de error fuera mayor que la de que no lo hubiese, el receptor sabría que tendría que permutar el símbolo recibido para encontrarse en una situación donde $e < 1/2$.

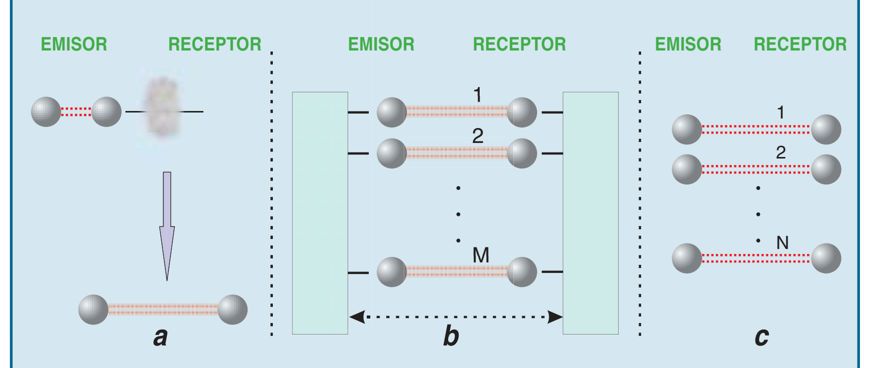
Una manera estándar de corregir los errores recurre a la redundancia: envía por el canal ruidoso varios pulsos con la misma información. En este caso, el bit lógico se codifica con más de un pulso de luz. El receptor, tras recibir y leer todos los pulsos, toma el valor más frecuente como bit enviado y prepara un nuevo estado si es necesario. Por ejemplo, supongamos que la probabilidad de error es de un 15 % y que el emisor utiliza cinco pulsos de luz para codificar el bit lógico. Si se produce un error en los pulsos, el receptor será capaz de reconstruir la información enviada, puesto que cuatro de los cinco pulsos no habrán sufrido error. En cambio, se tendrá un error en la recepción del mensaje cuando tres, cuatro o los cinco pulsos hayan experimentado un error en la propagación. La nueva probabilidad de error se verá entonces rebajada a aproximadamente un 2,66 %. No cuesta convencerse de que la probabilidad de error final puede hacerse tan pequeña como se quiera, si bien no nula, incrementando el número de pulsos que codifican un mismo bit lógico. Fijado el error final, el número de pulsos requerido dependerá de las propiedades de ruido del canal, es decir, de la tasa de error e. La redundancia constituye uno de los



3. PARA TELEPORTAR un bit cuántico, el emisor comparte con el receptor un estado máximamente entrelazado de dos bits cuánticos. El emisor realiza una medida del qubit a transmitir más la mitad que posee del estado entrelazado. Comunica el resultado obtenido (entre cuatro posibles) al receptor. El receptor, tras haber recibido la información (clásica) del resultado de la medida, realiza una operación sobre la mitad del estado entrelazado que tiene, con lo que consigue el estado que debía ser enviado sin error. Se debe notar que la partícula que contiene el estado cuántico a transmitir no se mueve del emisor, que sólo transmite el resultado de su medición. Al final del protocolo, no queda entrelazamiento entre emisor y receptor.

ANTONIO ACIN

Destilación de entrelazamiento



a. Emisor y receptor comparten un canal que produce decoherencia. El emisor prepara estados entrelazados de dos qubits y envía uno de ellos a través del canal. La transmisión es imperfecta, por lo que las dos partes tienen un estado entrelazado impuro (con ruido). El proceso se repite M veces.

b. Emisor y receptor procesan cada uno, de manera local, los estados cuánticos que poseen. Estas operaciones pueden ir acompañadas del envío de comunicación clásica en las dos direcciones, de emisor a receptor o viceversa. En este proceso, no se transmite ningún tipo de información cuántica por el canal. El objetivo es destilar entrelazamiento sin ruido.

c. Al final del proceso, se comparten $n < M$ estados entrelazados perfectos. Estos estados permiten teleportar qubits desde el emisor al receptor de manera perfecta. Por tanto, es entonces posible el envío de información cuántica sin errores.

ANTONIO ACIN

métodos más simples de corrección de errores en la teoría clásica de la información.

Pasemos ahora a analizar la situación donde la información se codifica en sistemas cuánticos. ¿Puede aplicarse el sencillo método de corrección de errores descrito con anterioridad? La respuesta es no. Esta nueva situación sirve muy bien para ilustrar de qué modo se ve afectado el procesamiento de información por el cambio de descripción de los dispositivos físicos utilizados para la codificación. Ya sabemos que en mecánica cuántica existe el teorema de la no clonación, según el cual es imposible obtener un proceso capaz de clonar de manera perfecta cualquier estado cuántico. Excluye el uso de la redundancia para corregir errores. Más en general, parecerá que la perturbación irreversible que el proceso de medición causa en el estado cuántico de un sistema dificulta que el estado que le llega al receptor se lea de modo que no se introduzcan más errores y se pueda reconstruir la información enviada (teniendo además en cuenta que el receptor habrá de compensar los errores que se produjeron durante la transmisión).

Fueron varios los investigadores que plantearon serias dudas acerca de la viabilidad de la corrección de errores para estados cuánticos [*véase* “Reglas para un mundo cuántico complejo”, por Michael A. Nielsen, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 2003]. Sin embargo, en 1995 Andrew Steane y, de nuevo, Shor, cada uno por su parte, introdujeron los primeros métodos cuánticos de corrección de errores. La solución pasaba por saber adecuar los métodos clásicos al nuevo entorno por medio de un recurso intrínsecamente cuántico: el entrelazamiento. La idea consistía en codificar con habilidad cada bit cuántico lógico en un estado entrelazado de siete qubits físicos (en el protocolo propuesto por Steane) o nueve (en el de Shor). Esta codificación tenía más robustez bajo decoherencia y permitía una reconstrucción perfecta del estado cuántico de partida (el bit cuántico lógico) en situaciones en las que se hubiera producido un error en uno de los bits cuánticos físicos. Por tanto, el uso de estos protocolos permite el procesamiento de información cuántica en casos donde la probabilidad de tener dos errores es baja, ya que un error solo siempre se corrige.

A partir de estos primeros esquemas, aparecieron nuevos y más refinados protocolos de corrección de errores. Hoy existe una formulación general del problema. Todos esos protocolos traducen a un entorno cuántico métodos ya conocidos en la teoría clásica de la información. A grandes rasgos, un esquema de corrección de errores cuántico consta de una etapa de codificación en el emisor, que almacena el qubit lógico en un estado entrelazado de diferentes qubits físicos, y un proceso de decodificación en el receptor, donde se detecta y corrige el error que se haya producido en el canal (*véase la figura 2*). Las propiedades de cada protocolo de corrección de errores vienen descritas por tres números $[[n, k, d]]$, donde n corresponde al número de bits físicos utilizados en la codificación, k al número de bits lógicos almacenados, y d está ligado al número de errores que se pueden corregir, n_E: $d = 2n_E + 1$. Por tanto, el esquema de Steane es [[7,1,3]], mientras que el de Shor es [[9,1,3]]. Para valores de n y k fijados, el mejor código es el que proporciona el mayor d, la mayor cantidad de errores corregibles. Sin entrar en más detalles, ejemplos de códigos conocidos son [[8,3,3]], [[21,6,5]], [[23,1,7]] o [[127,50,15]]. El mínimo código capaz de corregir un error es el [[5,1,3]].

Más allá de su importancia de tipo práctico, los métodos de corrección de errores supusieron un importante avance hacia la consolidación de la teoría de la información cuántica, al demostrar que se podía combatir la decoherencia. Recordemos que importantes investigadores habían expresado la posibilidad de que la codificación de información en estados cuánticos fuera demasiado delicada y sensible a la interacción con el entorno, y que ello supondría una barrera fundamental para la aplicación de la información cuántica. Los protocolos de corrección de errores demostraron que ello no era cierto: de modo parecido al caso clásico, si se tenía una cierta tasa de error inicial en el canal cuántico, podía llevarse a cabo una transmisión con probabilidad de error efectiva arbitrariamente pequeña.

El problema, pues, dejaba de residir en el lado teórico (si bien las técnicas para la mejora de los códigos correctores de errores siguen siendo objeto de intenso estudio) y se trasladaba al experimental. Para cuando el avance de la técnica permita un procesamiento cuántico de la información con buena robustez bajo decoherencia, se conocerán ya métodos que reducirán el nivel de ruido cuanto se quiera.

La teleportación

Los protocolos de corrección de errores demuestran que es posible adecuar una aplicación bien establecida en teoría clásica de la información al nuevo entorno cuántico. Hay, sin embargo, un método alternativo de corrección de errores intrínsecamente cuántico; sin análogo clásico, explota las propiedades del entrelazamiento. Antes de entrar en detalles, señalemos que la idea general radica en realizar la corrección de errores antes del envío de la información, en transformar el canal ruidoso en un canal sin errores. Una vez se ha establecido este canal cuántico, se puede proceder a la transmisión perfecta de la información. La teleportación cuántica desempeña un papel clave en este método.

La teleportación cuántica es una de las aplicaciones de la información cuántica más importantes y sorprendentes. El emisor recibe una partícula que codifica un bit cuántico, desconocido para él, que debe transmitir a un receptor. Una primera opción, trivial, consiste en que el emisor envíe la partícula directamente. Sin embargo, quizá no resulte posible; por ejemplo, porque el canal produzca demasiado ruido. Supongamos que emisor y receptor comparten dos bits cuánticos en un estado máximamente entrelazado. Es decir, emisor y receptor tienen cada uno una partícula cuántica, y el estado global de las dos viene dado por una superposición coherente de pesos iguales de $|00\rangle$ y $|11\rangle$. Gracias al esquema basado en la teleportación cuántica, el receptor puede, valiéndose de ese entrelazamiento y tras recibir dos bits de información clásica del emisor, reconstruir el bit cuántico de un modo perfecto.

Importa subrayar el papel de los dos bits clásicos que el emisor debe enviar al receptor para que éste sea capaz de reconstruir el estado. Sin estos dos bits, el proceso no puede llevarse a cabo, ya que el receptor no tendrá información hasta que no los reciba. Es decir, la teleportación no permite la transmisión instantánea de información. Es más bien un método, sorprendente, de transmisión de información cuántica por medio de un estado entrelazado y bits clásicos.

Alguien pudiera inferir que la teleportación implica que un bit cuántico es equivalente a dos bits clásicos. Una deducción falsa. Si el emisor quisiera especificarle el bit cuántico al receptor por medio de información clásica, tendría que dar una dirección en la esfera de Poincaré. Para hacerlo con buena precisión, se requeriría un gran número de bits clásicos (infinitos para conseguir una imprecisión nula). Además, en la teleportación el emisor no tiene por qué conocer el bit cuántico que envía. El entrelazamiento compartido por las dos partes es el recurso esencial en que se basa la teleportación. Esta se consume una vez el receptor ha reconstruido el bit cuántico: el entrelazamiento no sobrevive tras el final del proceso. Debemos retener lo siguiente: si emisor y receptor comparten un estado de dos qubits máximamente entrelazado, será posible el envío de un qubit sin errores por medio de la teleportación. En consecuencia, se podrá considerar a ese estado un canal cuántico perfecto.

Una pregunta surge de modo natural: ¿de qué forma emisor y receptor consiguen establecer el entrelazamiento inicial requerido para la teleportación? El emisor puede, en principio, preparar el estado localmente y enviar al receptor uno de los dos bits cuánticos. Sin embargo, debe hacerlo a través del canal que poseen, que es ruidoso. Recordemos que se debe crear una superposición coherente de $|00\rangle$ y $|11\rangle$; los mecanismos generadores de decoherencia del canal repercutirán en el estado enviado; emisor y receptor acabarán compartiendo una versión ruidosa del estado deseado, que no permitirá una teleportación perfecta.

Destilación de entrelazamiento

Las técnicas de destilación de entrelazamiento permiten transformar, con cierta probabilidad p, estados entrelazados ruidosos en estados máximamente entrelazados de dos bits cuánticos. Es decir, consiguen destilar el entrelazamiento impuro del estado que ha sufrido la decoherencia y transformarlo en entrelazamiento puro, sin errores. Más concretamente, existen secuencias de mediciones entre emisor y receptor, asistidas por comunicación clásica, que con probabilidad p transforman M copias de un estado ruidoso entrelazado en N copias de un estado puro máximamente entrelazado.
Emisor y receptor saben de modo exacto si el protocolo de destilación ha sido exitoso, lo que, recordemos, sucede con probabilidad p. Ahora resulta sencillo entender cómo pueden estas técnicas utilizarse para el envío de información cuántica a través de un canal ruidoso. El emisor, que ha de enviar N bits cuánticos, prepara un estado máximamente entrelazado y envía uno de los dos bits cuánticos al receptor. A causa de la decoherencia en la propagación, el estado final es impuro. Este proceso se repite M veces, por lo que emisor y receptor acaban con M copias del mismo estado. A continuación, emplean un protocolo de destilación cuántica que produce, con probabilidad p, N copias del estado máximamente entrelazado. Recordemos que estos estados son equivalentes a un canal cuántico sin ruido. El emisor puede consumir estos N estados en la transmisión sin errores de los N bits cuánticos por medio de teleportación, concluyendo así el envío de la información cuántica.

¿Es posible encontrar alguna relación entre la destilación de entrelazamiento y los métodos de corrección de errores? Se ha demostrado que si el flujo de comunicación clásica necesario en el proceso de destilación sólo cursa en una dirección, de emisor a receptor por ejemplo, se puede establecer una analogía entre ese método de destilación y un protocolo de corrección de errores. Sin embargo, esto deja de ser cierto si la destilación utiliza comunicación en las dos direcciones. Los métodos de destilación con comunicación bidireccional permiten la transmisión sin errores de información cuántica para canales cuyo nivel de ruido sea tal, que no se pueda aplicar ningún método cuántico de corrección de errores estándar. En ese sentido, los

protocolos de destilación de entrelazamiento son más potentes.

Métodos tolerantes de fallos

La discusión anterior ha servido para presentar los métodos habituales diseñados para el procesamiento cuántico de información bajo decoherencia. Por motivos de sencillez, se ha presentado en una situación de comunicación cuántica, donde se tienen dos partes separadas comunicadas por un canal ruidoso. Pero las mismas técnicas valen para la computación cuántica, donde se realizaría un procesamiento de un gran número de bits cuánticos. Si la operación es complicada y requiere un tiempo considerable, los efectos de decoherencia empiezan a adquirir importancia, ya que el sistema interacciona más de lo deseado con el entorno. Dicho de forma equivalente: no es posible garantizar que, durante todo el tiempo de ejecución, no exista ninguna parte del sistema que haya sufrido una pérdida de coherencia. De ahí se sigue que habría que alternar fases de computación y fases de corrección de errores, que emplearían los métodos descritos.

A lo largo de esta exposición hemos supuesto que las operaciones que hay que realizar para la corrección de los errores eran perfectas y no introducían más ruido. Eso no se cumple en una situación real. Resulta obligado, pues, analizar las consecuencias de habérselas con operaciones cuánticas imperfectas en los protocolos de corrección de errores. Sin entrar en más detalles, se ha demostrado que todos los métodos anteriores resisten fallos en las operaciones cuánticas que los componen. Se puede establecer un umbral de imperfección para ellas, de tal modo que aún sea posible realizar una transmisión o computación cuántica casi libre de errores. Todos estos resultados desembocan en los llamados "métodos tolerantes de fallos".

En resumen, hemos presentado las técnicas habituales para la corrección de errores en el procesamiento cuántico de información. El factor a combatir es la decoherencia, que destruye la peculiaridad cuántica del sistema: las superposiciones coherentes de estados, fundamento de cualquier protocolo de información cuántica. Durante la exposición hemos aprendido que se pueden trasladar ideas provenientes de la teoría clásica de la información al formalismo cuántico, acomodándolas a las nuevas reglas de juego. En otras ocasiones nos hemos encontrado ante situaciones intuitivamente difíciles de aceptar, debido a las peculiaridades del formalismo cuántico: estados de superposición, entrelazados o teleportación.

Los métodos que se han presentado aquí representan un primer paso, si bien crucial, de cara a explotar la gama de posibilidades que aparece al codificar la información en estados cuánticos. La mecánica cuántica ofrece multitud de situaciones sorprendentes, que desafían nuestra intuición y no tienen un análogo clásico. ¡Aprovechémoslas!

El autor

Antonio Acín Dal Maschio es ingeniero de Telecomunicaciones por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), licenciado en físicas y doctor en física teórica por la Universidad de Barcelona (UB). Tras una estancia posdoctoral en el Grupo de Física Aplicada de la Universidad de Ginebra, se trasladó al Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) de Barcelona, donde se encuentra en la actualidad. Su tarea investigadora se centra en los campos de la teoría de la información cuántica y de la óptica cuántica.

Bibliografía complementaria

INTRODUCTION TO QUANTUM COMPUTATION AND INFORMATION. Dirigido por H.-K. Lo, S. Popescu y T. Spiller. World Scientific; Londres, 1998.

QUANTUM COMPUTATION AND QUANTUM INFORMATION. M. A. Nielsen y I. L. Chuang. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

THE PHYSICS OF QUANTUM INFORMATION: QUANTUM CRYPTOGRAPHY, QUANTUM TELEPORTATION, QUANTUM COMPUTATION. Dirigido por D. Bouwmeester, A. Ekert y A. Zeilinger. Springer Verlag; Berlín, 2000.

INITIATION À LA PHYSIQUE QUANTIQUE. Valerio Scarani. Vuibert; París, 2003.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Norbert Treitz

Dammi y las fuerzas ficticias

Dammi está compuesto por masas puntuales, todas del mismo peso, unidas por muelles elásticos casi sin masa. Puede percibir si sus muelles están estirados o comprimidos —y nosotros verlo—. De vez en cuando, examina las diferentes partes de su cuerpo e interpreta, con mayor o menor coherencia, el estado en que se encuentran. A veces utiliza medios de locomoción o se monta en un carrusel; otras se deja caer de un árbol, como una manzana, o maltratar, como si fuera una pelota de tenis. Sobre todo le gusta ser astronauta.

Las fuerzas de aceleración desempeñan una función importante en su movimiento. Aquí en el suelo nos molesta la omnipresencia de una fuerza aceleratriz, la gravitatoria. A diferencia de la atracción electrostática, no podemos compensarla por medio de otras fuerzas de signo contrario; nos conformaremos, pues, con un plano horizontal. Nos valdría una de esas mesas de aire que a veces hay en las salas de recreativos, sobre las que un disco se desliza sin fricción. O podríamos lanzar a Dammi al aire y observar el movimiento de su sombra sobre una mesa iluminada perpendicularmente desde arriba. Mientras no haya fricciones turbulentas o campos magnéticos que acoplen entre sí las magnitudes de las diferentes dimensiones, podremos olvidarnos de la fuerza gravitatoria.

Fuerzas de contacto: Sobre ese plano que hayamos escogido podremos acelerar de dos maneras nuestro Dammi, acostumbrado a vivir libre de fuerzas. La primera posibilidad: tiremos con el dedo, o por medio de un hilo atado con ese propósito, de una o más masas puntuales de su superficie. Así las aceleraremos y estiraremos los muelles contiguos. Si damos un tirón, una onda atravesará a Dammi. Si estiramos durante más tiempo, con fuerza constante, hacia adelante y las ondas debidas al tirón ya se han amortiguado, Dammi se acelerará uniformemente como un todo, aunque por delante esté muy estirado, por dentro sólo a medias y detrás no lo esté en absoluto.

Al apretar la superficie posterior, la parte de atrás se comprimirá mucho, algo la de en medio y nada la parte anterior. Más radical es el cambio cuando Dammi sirve de pelota de tenis: al contactar con la raqueta se deforma casi hasta volverse una semiesfera; el lado plano es el que está en contacto con la raqueta. En ambos casos Dammi puede consultar sus muelles internos y llegar a la conclusión de que algo lo estira o aprieta, y distinguir entre ambas situaciones.

En el caso de que algún malvado le haya producido un corte sagital a Dammi, al estirar la parte anterior sólo se acelerará la mitad delantera y la trasera quedará sin acelerar ni deformar. Pero si se presiona con la misma fuerza de adelante atrás y de atrás adelante, aunque no se acelerará, sí se comprimirá uniformemente. Para eso sirve un muelle en la estática, y viceversa cuando se alarga al tirar de él. ¿Se necesitan, pues, dos fuerzas para una deformación? No, pero sí para que sea uniforme.

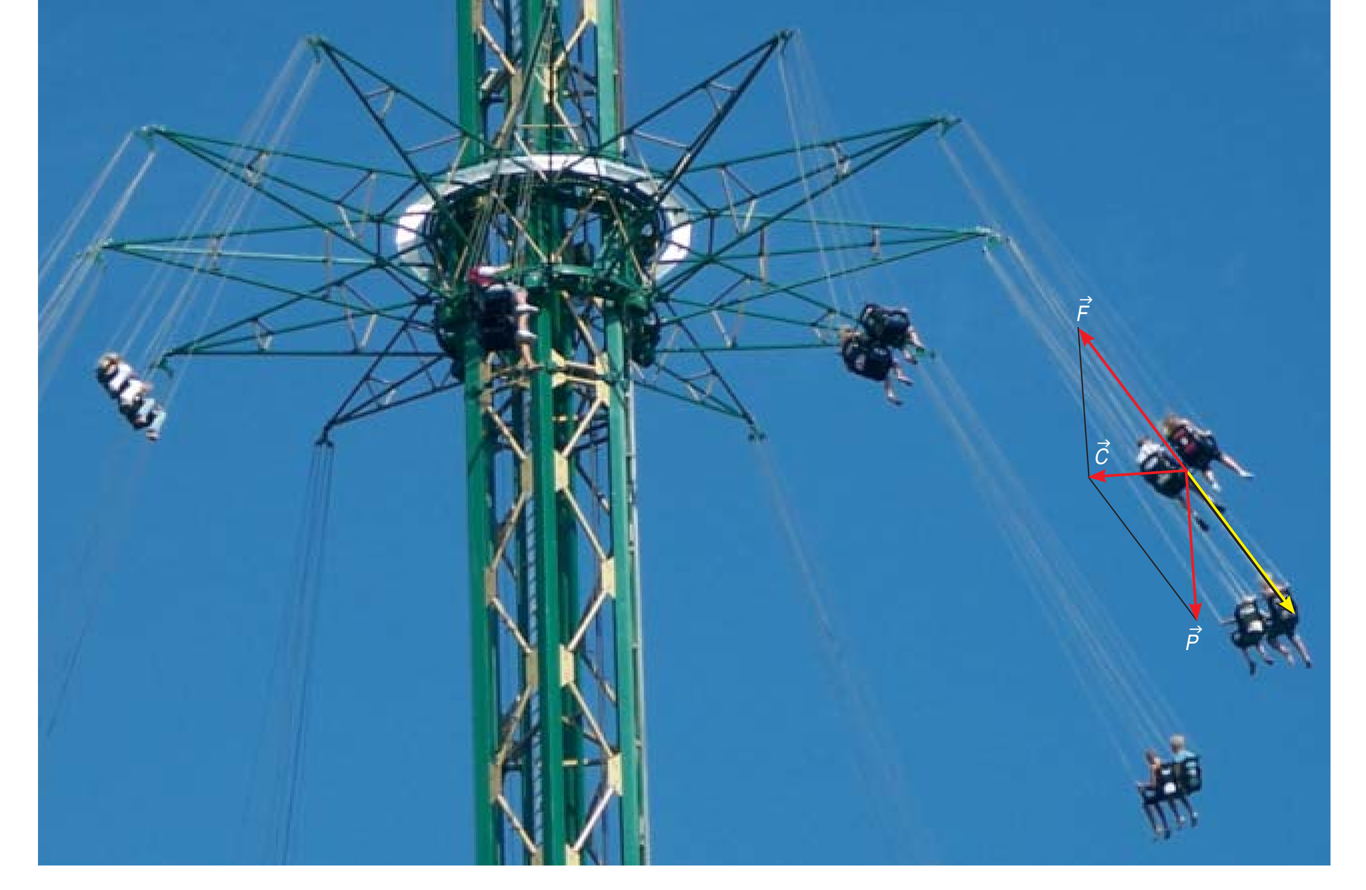
Se denomina muchas veces a las fuerzas que actúan sobre la superficie o contorno de un objeto —como estas de las que acabamos de hablar— “fuerzas de superficie”. Desgraciadamente, esta denominación no se utiliza de forma unívoca; por ello, seremos prudentes y las llamaremos “fuerzas de contacto”.

Fuerzas sobre el volumen: La otra posibilidad de acelerar a Dammi parece mucho más difícil técnicamente. Atemos un hilo a cada una de sus masas puntuales y tiremos de ellas al mismo tiempo con los mismos vectores de fuerza. Así, todas las masas puntuales, incluidas las del interior, recibirán la misma aceleración; Dammi no sufrirá ondas ni deformaciones. Daría igual que alguien lo hubiera cortado por la mitad: la parte delantera y la trasera se acelerarían igual.

“Fuerzas sobre el volumen” son la fuerza electrostática —que sólo se deja notar de forma excepcional, por ejemplo en nubes cargadas, porque las cargas eléctricas libres en un cuerpo sólido suelen repelerse hacia la superficie— y, sobre todo, la gravitación. La Tierra no tira de la porción inferior de la manzana, sino uniformemente de todas sus partes. Cuando la manzana cae, da igual que esté cortada; la cohesión no importa. La fuerza de la gravedad es como un tejido compuesto



THE MANNEQUIN GALLERY, PACOIMA, CALIFORNIA, EE.UU.; www.mannequingallery.com



1. El peso de Dammi $\vec{P}$ y la fuerza $\vec{F}$ de la cadena del carrusel se añaden para dar la fuerza centrípeta $\vec{C}$, que guía el columpio a lo largo de la trayectoria circular. Pero Dammi interpreta la dirección contraria a la fuerza de contacto $\vec{F}$ como “abajo”.

de muchos hilos finos que tirasen de los objetos: cada masa puntual de la manzana está unida con cada una de la Tierra. Sólo en una aproximación cabe imaginar la fuerza gravitatoria como un hilo singular que une ambos centros de masas y tira de ellos; nunca, como unos hilos que conecten la superficie de la Tierra y la parte de abajo de la manzana.

Un ejemplo de movimiento regido por fuerzas sobre el volumen: el de un satélite en el espacio exterior cercano. Describirá una elipse de Kepler o, en general, una sección cónica. Para recorridos cortos, en los que se puede asumir que el campo gravitatorio de la Tierra es homogéneo, un segmento abierto de trayectoria elíptica podrá equipararse, cerca del vértice, a un tiro parabólico, que, a su vez, puede degenerar en una subida y caída verticales. En todos estos casos, Dammi seguirá sin deformarse, mientras su parvo tamaño permita despreciar la inhomogeneidad del campo radial. En todos estos casos Dammi afirmará que es ingrávido, aunque en realidad sólo estará libre de fuerzas de contacto.

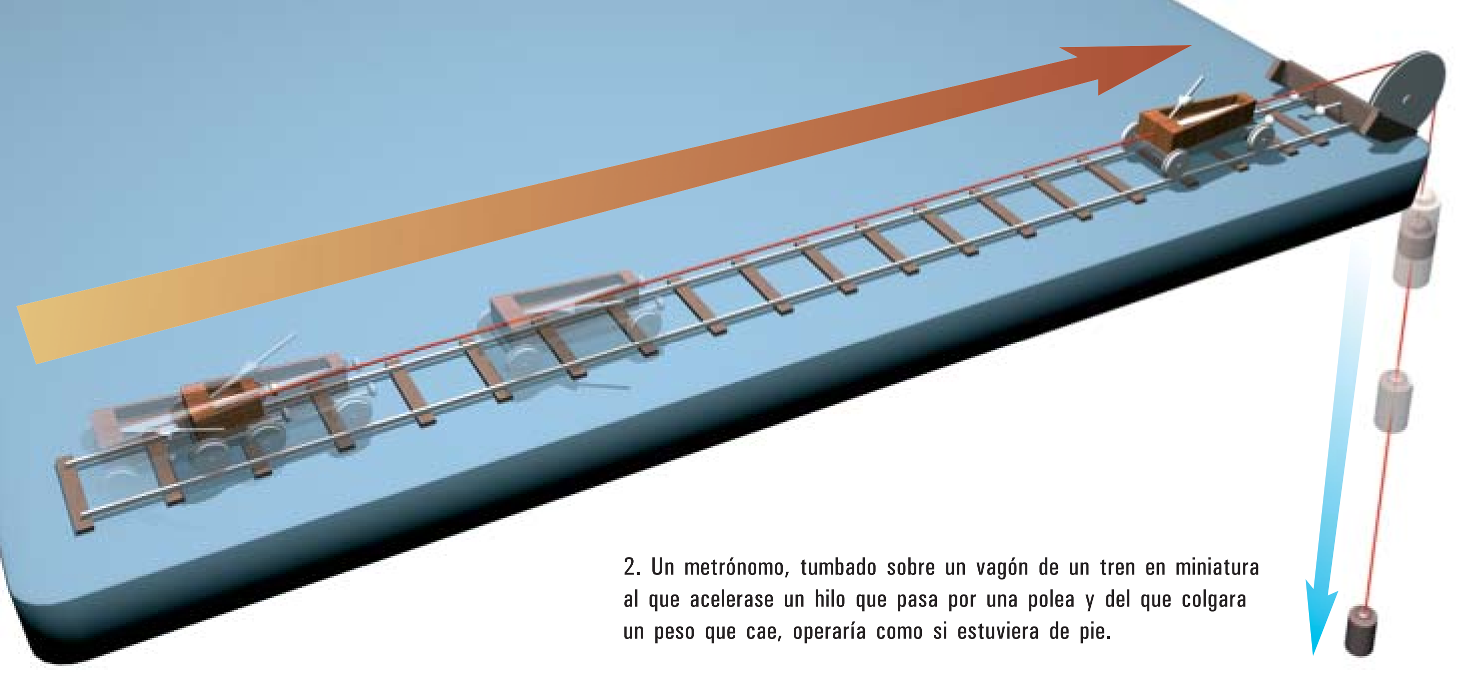
Aún más extraño: unamos dos dammis por sus superficies frontales, con hilos largos; pongámosles a dar vueltas, horizontalmente, alrededor de su centro de masas común. Podríamos hacerlo sobre una mesa de aire o en caída libre; nos restringiremos así a las componentes horizontales y podremos ignorar la fuerza de la gravedad. Ambos dammis se estirarán por su vientre, pero no por su dorso. Dammi afirmará ahora que siente algo parecido a una fuerza gravitatoria que apunta hacia afuera. La denominará “fuerza centrífuga” o “gravedad artificial”; ya no hablará de ingravidez.

Física en el sillón: Pongamos ahora a Dammi, sometido como cualquiera a los efectos del campo gravitatorio, en una silla, en una cama o en una báscula de baño. Sin ese sostén, la fuerza de la gravedad lo aceleraría hacia abajo sin deformarlo. Pero los muebles en que reposa se deformarán, con una oscilación amortiguada; presionarán por debajo a Dammi con fuerzas de contacto, cuya intensidad posibilite una resultante nula: Dammi no atravesará el suelo, pero tampoco le catapultarán los muelles del sillón hasta el techo. Debido a estas fuerzas de contacto, y sólo indirectamente la fuerza de la gravedad, las partes inferiores de Dammi estarán algo comprimidas.

Eso es lo que sin cesar nota cuando está de pie, estirado o sentado. Reconoce entonces la coincidencia de la orientación entre arriba y abajo con la dirección en que se movería un bolígrafo al que se dejara caer. Si despertamos a Dammi de su sueño, podrá decir con los ojos cerrados dónde está abajo. No podría hacerlo en caída libre.

En la pista de despegue, el asiento del avión presiona a nuestro Dammi firmemente desde atrás; lo hace de suerte tal, que recibe la misma aceleración que el avión que despega. Esta sensación en la espalda la conoce Dammi de estar echado sobre el sofá, sólo que ahora es más fuerte. Cuando el despegue le sorprende con los ojos cerrados, cree que su respaldo se ha inclinado hacia atrás, llevándole a él a esa misma posición, y que la fuerza de la gravedad es más fuerte de lo acostumbrado. Siente la sensación de que le están empujando hacia atrás.

¿Qué indica en realidad una báscula de baño? La deformación de sus muelles y, por lo tanto, la fuerza con que acelera a quien está de pie sobre ella. Si no



2. Un metrónomo, tumbado sobre un vagón de un tren en miniatura al que acelerase un hilo que pasa por una polea y del que colgara un peso que cae, operaría como si estuviera de pie.

SIGANIM/SDW

se mueve, esa fuerza será como la fuerza gravitatoria entre esa persona y la Tierra, pero en sentido contrario. Aunque la persona brinque y llegue a separarse de la báscula, el promedio temporal seguirá siendo el mismo: al fin y al cabo, así no saldrá del baño por el suelo o por el techo. Mas, a cada instante, la aceleración será la correspondiente a la suma de ambas fuerzas. La "fuerza gravitatoria que se siente" será siempre la imagen especular de la fuerza del muelle: mientras el individuo esté en el aire, cero. Esto es "ingravidez" en el mismo sentido (es decir, igual de engañoso) en que se habla de ingravidez en un satélite terrestre artificial o como podría también hablarse con respecto a cualquier voltereta.

Fuerzas centrífugas: En un carrusel de columpios, la fuerza gravitatoria acelera a Dammi hacia abajo sin deformarlo. Las cadenas tiran hacia arriba y adentro; el columpio presiona a Dammi desde abajo y fuera hacia arriba y dentro: lo comprime en la superficie de contacto, o sea, en sus posaderas, orientadas hacia fuera y abajo. La resultante de todas las fuerzas, que apunta horizontalmente hacia dentro, es la fuerza centrípeta, que cierra la curva de la trayectoria para dibujar un círculo.

Pero si preguntamos a Dammi dónde le parece —con los ojos cerrados— que está "abajo", señalará hacia abajo y fuera. No percibirá la trayectoria circular; sólo se notará algo más pesado de lo normal. Según su impresión, estará sentado verticalmente en el columpio. Con los ojos abiertos, verá que viaja en círculo alrededor de un eje perpendicular al suelo de la verbena. Llegará a la conclusión de que la fuerza gravitatoria que percibe —la fuerza contraria a la de contacto— tiene una componente horizontal hacia fuera, además de la fuerza gravitatoria genuina. A ese aporte lo denominará "fuerza centrífuga".

Un ser como Dammi —nosotros, por ejemplo— tiene conciencia exacta de las fuerzas de contacto que experimenta gracias a terminaciones nerviosas u otro tipo de medidores de las tensiones elásticas internas. Ignorará, en cambio, las fuerzas que actúen sobre el volumen. La suma vectorial de unas y otras determina la aceleración. Casi siempre es cero en la vida cotidiana. Por eso nos hemos acostumbrado a considerar gravitatoria la fuerza contraria a la que sentimos, que es de contacto. La experimentamos sólo indirectamente.

A veces dicha suma no se anula. Las fuerzas de contacto son iguales a cero y la fuerza de la gravedad sigue existiendo. Sucede, por ejemplo, muy brevemente, en la trayectoria libre que seguimos cuando saltamos o caemos; sólo puede durar más en los medios de locomoción modernos. Y por ahí se abren paso las malas interpretaciones, hasta llegar a la grotesca denominación de "ingravidez" para lo que sucede cuando se está en órbita, en una trayectoria que en el fondo no es más que un disparo horizontal. Lo único que tiene de especial el movimiento en órbita es que permanece siempre horizontal; difiere en ello de la trayectoria de un tiro horizontal cercano al suelo, la mitad descendente de un tiro parabólico. La trayectoria de una nave espacial sin propulsión es una forma de caída libre en el campo de todas las masas presentes, incluidos el Sol y el resto del universo.

Dentro de una nave espacial en órbita que midiese, en la dirección radial, una millonésina del radio de la órbita, se apreciaría, en esa sexta posición decimal, que la fuerza de atracción del planeta disminuiría con la distancia. Según la tercera ley de Kepler, la parte de la nave que mirase al planeta y la que mirase al espacio exterior tendrían, en tal caso, unos períodos orbitales algo diferentes; si no estuviesen soldadas, se separarían una de otra. En cambio, más allá del límite de Roche la propia gravedad del satélite sustituye a la soldadura y mantiene la cohesión del objeto. Este radio orbital límite se encuentra, según la relación de las densidades del planeta y del satélite, a una distancia de entre dos y tres radios del planeta. Viene a señalar la frontera entre la región interna, donde se forman los anillos, y la externa de los satélites planetarios.

En nuestra nave espacial, más acá del límite de Roche, un hilo entre dos masas libres se tensará muy débilmente en la dirección radial. A ese efecto se le denomina fuerza de marea, pues es el que experimentan las moléculas de agua en los mares de la Tierra al girar ésta alrededor del centro de masas del sistema Tierra-

Luna en el campo radial de la Luna. Un montoncito de arena dentro del límite de Roche se desmigajará e incorporará a un anillo.

El metrónomo en el coche-cama: ¿Qué sucede si se arroja por la ventana un reloj de péndulo clásico —con o sin cuco— o un reloj de arena? Nada más soltarlo, se quedará parado, pese a que la fuerza gravitatoria actúa sin resistencia y completamente sola durante la caída libre.

Para mantener el gasto en relojes de péndulo dentro de lo razonable, experimentaremos mejor con un metrónomo mecánico (no electrónico) lo más pequeño posible. Tendrá un péndulo corto, de eje de giro horizontal. Las pérdidas por fricción se restituyen por medio de un resorte. Los metrónomos utilizados para estudiar música tienen una masa desplazable que se puede ajustar para los diferentes tempos. Si se retira totalmente, se obtiene un tempo muy rápido.

Si el metrónomo está tumbado, es decir, de tal manera que su eje quede vertical y el plano del péndulo horizontal, no funcionará, aun cuando se le haya dado cuerda y propinado un golpecito para impulsarlo, a no ser que se le acelere —horizontalmente— en la dirección que en el uso normal del metrónomo se halla “arriba” (*véase la figura 2*). Marcará entonces el compás con una frecuencia uniforme, proporcional a la raíz cuadrada de la aceleración.

También podríamos colgar el metrónomo en posición vertical de una larga cinta elástica, de modo que oscile arriba y abajo a lo largo de varios metros, mientras marca el compás. En el punto más alto de la oscilación marcará el compás muy despacio, y hasta se parará si la cinta elástica está floja. Al pasar por la altura media marcará el compás igual de rápido que cuando no cuelga de una cuerda y reposa en una mesa. En el punto más bajo batirá muy rápidamente. ¿Tiene esto que ver con la fuerza de la gravedad o más bien con la tensión de la cinta elástica?

Nuestro metrónomo es un dammi. De una manera directa, sólo puede percibir fuerzas de contacto. Pero no es la aceleración de la gravedad la que pone en movimiento el péndulo del reloj de cuco, una vez apartado de su posición de equilibrio. El movimiento se debe a la aceleración, en sentido contrario, que procede del clavo de la pared y se comunica al punto del que cuelga el péndulo a través de la caja. La fuerza gravitatoria cumple una mera función auxiliar en esta disposición: evita que el clavo empuje el reloj de péndulo hacia el cielo.

Para el período de oscilación de un péndulo suele darse la fórmula $T = (g/l)^{1/2}$, donde g indica la aceleración de la gravedad y l la longitud del péndulo (idealizada matemáticamente). Tendría que ser a en vez de g, donde a simbolizaría la aceleración (debida a la fuerza de contacto) que actúa directamente sobre el punto del que cuelga el péndulo y sólo entonces sobre la masa que oscila. Pero no se cae en la cuenta porque, para todos los relojes de cuco y demás péndulos, resulta válido que $a = g$, salvo el signo.

Fuerzas ficticias: El recurso teórico común para explicar las fuerzas centrífugas y similares consiste en pasar al sistema de referencia (acelerado) del observador. Por el simple hecho de describirlo en este sistema que se acelera con a, un objeto de masa m recibe una fuerza ficticia ma, que parece también ser la fuerza que percibimos.

Expuesto con mayor precisión, lo que sentimos directamente son las fuerzas de contacto. Y las interpretamos como la suma de la fuerza gravitatoria y la fuerza ficticia, aunque con signo contrario. Cuando no interviene ninguna fuerza gravitatoria, como en el caso del respaldo, la fuerza ficticia es la contraria de la fuerza de contacto. Pero ésta es mensurable en el interior de Dammi, con independencia del sistema de referencia: el estado de las terminaciones nerviosas o de las longitudes de los muelles no depende del sistema de referencia que haya escogido el observador. Las fuerzas ficticias de las transformaciones entre sistemas de referencia acostumbran ser las fuerzas aparentes percibidas, y no encierran, pues, la clave para la comprensión de éstas.

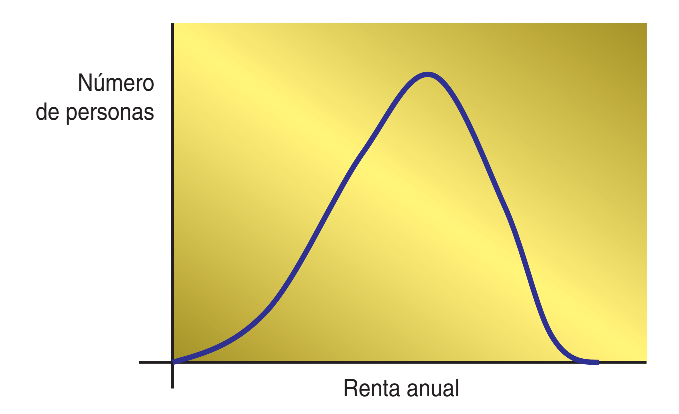
¿De verdad le parece más simple al lector la explicación que echa mano de un sistema de referencia giratorio?

JUEGOS MATEMÁTICOS

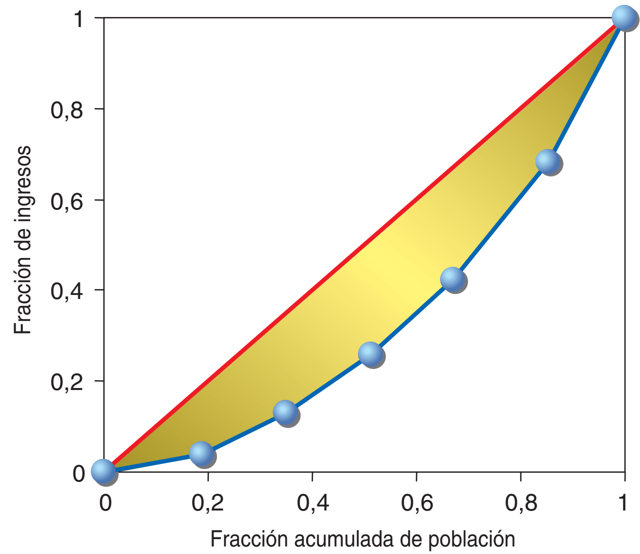
Juan M.R. Parrondo

Medir la desigualdad

La economía es una disciplina muy compleja. Aunque algunos economistas mediáticos se empeñen en convencernos de que es una ciencia exacta con recetas indiscutibles (y la mayoría de las veces tendentes al neoliberalismo), lo cierto es que nadie dispone de un modelo macroeconómico perfecto, ni suficientemente contrastado. Algunos principios válidos para una época o un país pueden dejar de funcionar en otro contexto en el que sean diferentes los modos de producción, la técnica, los hábitos culturales y las motivaciones de la población. También los métodos de medición de algunos parámetros macroeconómicos, como el producto nacional bruto, están sujetos a constante revisión y mejora. Y, aun disponiendo de datos precisos y modelos fiables, ¿cuál debería ser el objetivo de la política económica?



1. Posible distribución de la renta en un país.



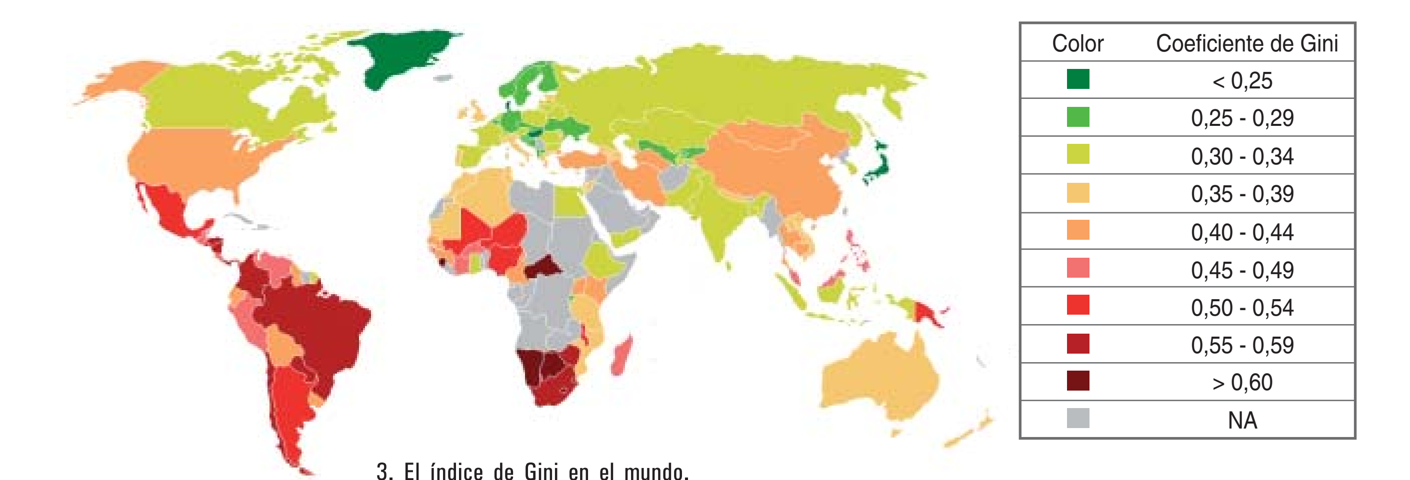
2. Curva de Lorenz de los ingresos de las familias españolas. El área amarilla, multiplicada por dos, es el índice de Gini.

¿Aumentar el producto nacional bruto, la cohesión social, el bienestar? Si la primera de estas variables es fácilmente cuantificable, ¿cómo podemos medir las dos últimas?

Algunos economistas han dedicado sus esfuerzos a encontrar parámetros que cuantifiquen aspectos económicos de importancia social. Uno de ellos es la desigualdad económica, en términos de renta o en términos de patrimonio. El punto de partida en ambos casos es la distribución de renta o patrimonio, respectivamente, a lo largo de la población. En la figura 1 vemos una posible distribución de la renta anual en un país. La desigualdad económica se podría cuantificar a través de la "anchura" de la curva. Se han propuesto muchas magnitudes que miden esta anchura, como la diferencia entre el más rico y el más pobre o la dispersión de las rentas. Sin embargo, a lo largo del tiempo se ha impuesto con bastante fuerza el llamado *índice o coeficiente de Gini*, definido por el estadístico italiano Corrado Gini en un trabajo de 1912. En lugar de trabajar con la distribución de renta de la figura 1, Gini utilizó la llamada *curva de Lorenz*, en la que se representa la fracción de población que dispone de una fracción dada de la riqueza o de los ingresos totales de un país.

Para entenderlo mejor, veamos un ejemplo con los ingresos anuales de los hogares españoles en 2004, mostrados en la tabla. Se han dividido los hogares en 6 tramos de acuerdo con sus ingresos anuales. En cada tramo podemos ver el número total de hogares y el total de ingresos de dichos hogares (los datos han sido tomados del Instituto Nacional de Estadística, aunque han sido ligeramente modificados para no tener en cuenta hogares con ingresos desconocidos y para calcular los ingresos por tramo de renta). A partir de estos datos he calculado el porcentaje sobre el total, tanto de hogares como de ingresos y, finalmente, los porcentajes acumulados, es decir, la suma de porcentajes correspondientes a tramos inferiores o iguales a uno dado. Estos porcentajes acu-

	Número de hogares (en miles)	Porcentaje de hogares	Porcentaje acumulado de hogares	Total ingresos (en millones de euros)	Porcentaje de ingresos	Porcentaje acumulado de ingresos
Hasta 9000 euros	2762	18,80	18,80	12,43	4,04	4,04
De 9000 a 14.000 euros	2376	16,18	34,98	27,32	8,88	12,91
De 14.000 a 19.000 euros	2394	16,30	51,28	39,50	12,83	25,74
De 19.000 a 25.000 euros	2317	15,77	67,05	50,97	16,56	42,30
De 25.000 a 35.000 euros	2675	18,21	85,26	80,24	26,06	68,36
Más de 35.000 euros	2164	14,74	100,00	97,40	31,64	100,00
Totales:	14.688	100,00		307,86	100,00	



3. El índice de Gini en el mundo.

mulados, coloreados en la tabla, son los que se utilizan para dibujar la curva de Lorenz, mostrada en la figura 2 (se suelen utilizar fracciones en lugar de porcentajes, por lo que he dividido entre 100 los datos de la tabla para conseguir los puntos de la figura).

Cualquier curva de Lorenz, como le ocurre a la de la figura 2, comienza en el punto (0,0) y termina en el (1,1), y es creciente, cóncava y se encuentra siempre por debajo de la diagonal. Nos informa de qué fracción de población acumula una cierta fracción de ingresos. Por ejemplo, a partir de la tabla o de la figura 2, podemos decir que, en España, el 85,26 % de los hogares dispone del 68,36 % de los ingresos totales. En ocasiones, para indicar la desigualdad de un país, se pueden leer en la prensa afirmaciones como: "el 10 % de la población posee el 70 % de la riqueza total del país", o, equivalentemente, "el 90 % de la población sólo dispone del 30 % de la riqueza". Este dato no es más que un punto en la curva de Lorenz, un punto cuya coordenada horizontal sería 0,9 y cuya coordenada vertical sería 0,3. Esta hipotética curva de Lorenz, afortunadamente muy distinta de la de nuestro país, estaría muy pegada al eje horizontal, puesto que pasa por el punto (0.9, 0.3) y luego salta bruscamente hasta el punto (1,1). Es una curva de alta desigualdad. Por el contrario, la diagonal roja de la figura 2 corresponde a una sociedad completamente igualitaria, en donde todos los hogares tendrían los mismos ingresos.

Pues bien, el índice de Gini, G, mide cuánto se separa la curva de Lorenz de esta diagonal que corresponde a la igualdad perfecta. Más concretamente, es el área comprendida entre la curva y la diagonal, es decir, el área de la región sombreada en amarillo en la figura 2, multiplicada por 2. Esta multiplicación se realiza para que el índice G tome valores entre 0 (igualdad absoluta) y 1 (desigualdad absoluta).

Una de las ventajas del índice de Gini frente a otros indicadores de desigualdad estriba en lo siguiente: puesto que se define en términos de fracciones de población y riqueza, es independiente de los valores totales, es decir, de la población y del producto interior bruto del país. Tiene otras propiedades matemáticas interesantes. Por ejemplo, se puede demostrar que es igual al valor medio de la diferencia relativa entre los ingresos de dos personas cualesquiera. Con otras palabras, si tomamos todos los posibles pares de personas, calculamos la diferencia de ingresos, sumamos todas las diferencias y dividimos por el número de pares, obtenemos el valor medio de la diferencia. Dividiendo por la renta per cápita, tendríamos ese valor medio en términos relativos, que coincide precisamente con el índice de Gini.

En la figura 3 podemos ver un mapa del mundo con los índices de Gini de cada país. Se puede apreciar una cierta correlación entre igualdad y desarrollo, con una excepción generalizada en los países ex comunistas, que tienden a índices de Gini más bajos, y también con notorias excepciones como el alto nivel de desigualdad de los Estados Unidos y el bajo Gini de India o algunos países africanos. En Internet pueden encontrar más datos, como la evolución del índice de Gini a lo largo del tiempo. Con ellos se puede analizar el efecto de algunas políticas sobre la desigualdad. Por ejemplo, tanto en Reino Unido como en los Estados Unidos, se aprecia un incremento de la desigualdad coincidente con las políticas económicas de Reagan y Thatcher.

El índice de Gini está sujeto a algunas ambigüedades en su cálculo, como la elección de familias o personas para dibujar la curva de Lorenz o la forma de computar sus ingresos. Quizá la base de datos más rigurosa y documentada sobre desigualdad e índices de Gini sea la del Instituto Mundial para la Investigación en Economía del Desarrollo de la Universidad de las Naciones Unidas (WIDER, www.wider.unu.edu). Otra fuente importante de datos es el Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (www.undp.org), en donde pueden encontrar diversos indicadores de desigualdad de todos los países del mundo. Si bien el índice de Gini ha recibido algunas críticas y se dispone de otros indicadores alternativos, lo cierto es que hoy en día es uno de los más utilizados y se ha convertido en una herramienta econométrica imprescindible, como pueden comprobar si buscan en Internet referencias al mismo. El simple hecho de que dirija la atención de los economistas hacia el problema de la desigualdad económica lo convierte en un concepto que merece la pena difundir y estudiar con más profundidad. Aquí hemos discutido únicamente su definición, pero existen multitud de trabajos que estudian sus propiedades matemáticas, que diseñan nuevos métodos para su cálculo o tratan de incorporarlo a modelos macroeconómicos.

Mark Fischetti

MOTORES MINUSCULOS

Giran y oscilan

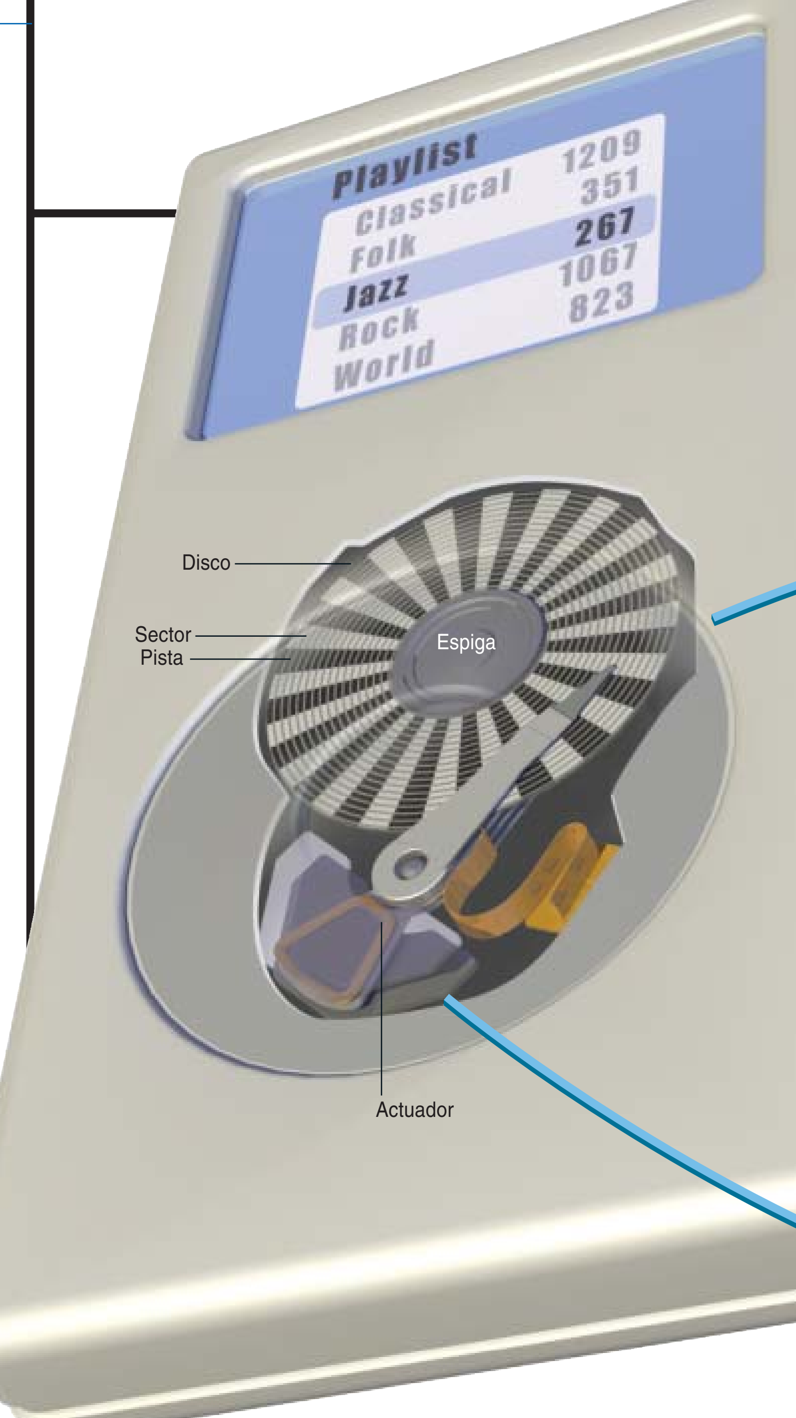
Reproductores de música, cámaras, teléfonos móviles... los productos de consumo portátiles son cada vez más pequeños. Parte del mérito corresponde a la miniaturización de la electrónica, pero también a unos motores que parecen menguar de modo imparable. La mayoría de ellos se basan en la misma física que sus parientes de mayor tamaño; la clave está en el diseño y el ingenio aplicado a la manufactura.

Los reproductores de MP3 brindan un instructivo ejemplo: albergan unas 230 canciones, o 0,93 gigaoctetos de datos, por centímetro cuadrado en un disco duro magnético que es más delgado que una moneda de diez centavos. El disco gira arrastrado por un motor de espiga, en cuyo centro se halla un rotor de sólo dos milímetros de grueso. Esta y otras piezas nos cabrían en la punta del meñique.

La mayoría de los motores de gran tamaño giran sobre pequeños cojinetes de bolas o de cilindros, pero la unidad de disco debe girar con una precisión de 0,05 micras. La manufactura de tan minúsculos cojinetes de bolas capaces de operar con tales márgenes resultaría prohibitivamente cara. Por ello, esos motores emplean un fluido en lugar de cojinetes; en general, un aceite. Los fabricantes están experimentando ahora con cojinetes de aire, pues unas unidades que contengan más información exigirán velocidades de rotación mayores, que, a su vez, requerirán un frotamiento menor que el que ofrece el aceite más lubricante.

Para leer con prontitud y precisión una información tan densamente empaquetada hay un segundo motor, un actuador de bobina de voz, que oscila adelante y atrás por encima de las pistas magnetizadas del disco. Se trata de una variante de los actuadores de mayor tamaño. Sin embargo, las pistas se están estrechando y adensando tanto —hasta una décima de micra—, que si crece más la densidad de empaquetamiento podría hacer falta un micromotor, fabricado con técnicas microelectromecánicas, en la punta del actuador para el ajuste fino del posicionamiento del cabezal. De ese mismo tipo se están diseñando unos motores que algún día podrían despejar de placas las arterias atascadas o reparar células dañadas.

En el mercado están entrando motores de materiales piezoeléctricos que generan el movimiento por la deformación de las piezas. No obstante, los motores de espiga estarán siempre presentes para accionar las unidades de minidisco, incluso las de mayor densidad, que guardan archivos de vídeo. Los proveedores están trabajando sobre proyectos de imanes de intensidad creciente y tamaño menguante para reducir el consumo de los motores, alargando así la vida de las baterías.



GEORGE RETSECK

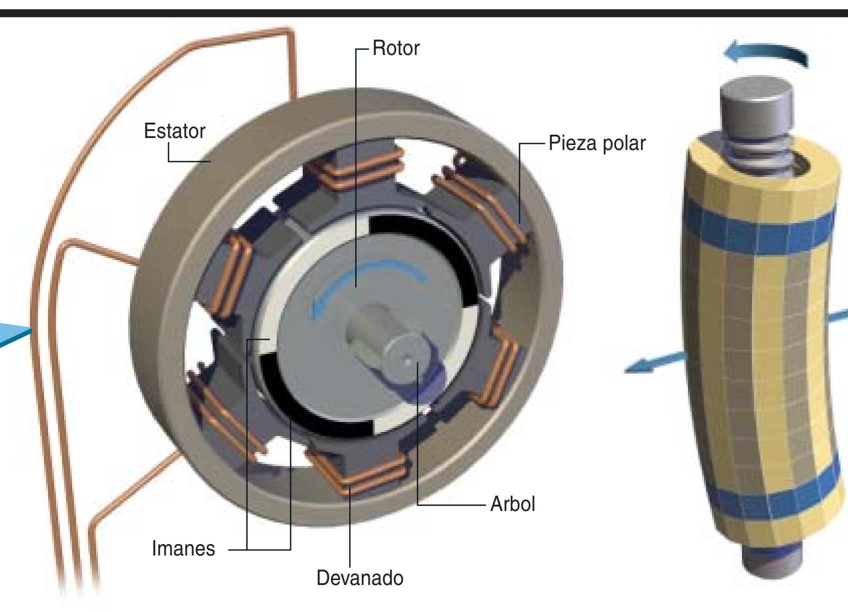
1. LAS UNIDADES DE DISCO DURO como las de muchos reproductores de MP3 requieren un motor que haga girar el disco magnético, para que pueda leerse el sector correcto, y un motor actuador que desplace el cabezal de lectura adelante y atrás para que acceda a la pista de datos deseada.

¿SABIA USTED QUE...?

➤**BIOLOGIA**: Ciertas bacterias se propulsan mediante un flagelo, una cola en forma de látigo. Las moléculas que rodean su base liberan energía de modo que hacen rotar esa hebra de acá para allá. Así inspirados, los expertos se afanan en proyectar motores moleculares de factura humana que roten a velocidades predeterminadas o giren hasta posiciones prefijadas bajo la acción de la luz. Esos motores se insertarían en células vivas para la manipulación de procesos internos.

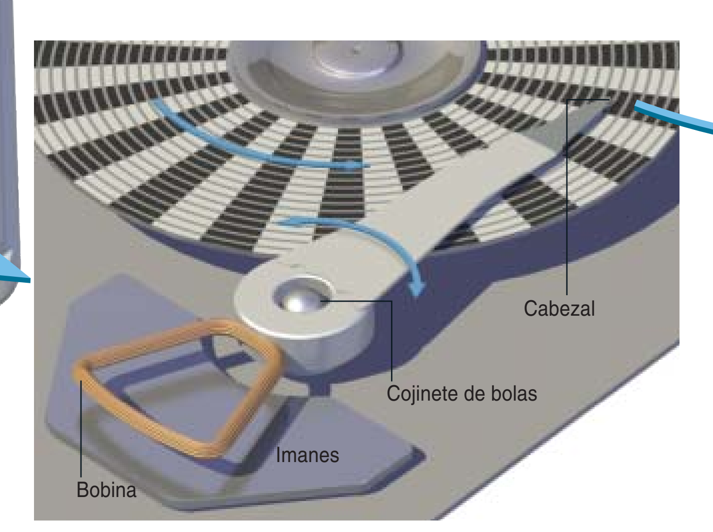
➤**QUIMICA**: Los líquidos que se mantienen estables entre intervalos de temperatura amplios son cruciales para los motores en miniatura. Se trata de máquinas silenciosas que generan poco calor. Superan, pues, las dificultades de ruido y de enfriamiento propias de los modelos de mayor tamaño. Sin embargo, deben operar en los gélidos inviernos segovianos y sobre el ardiente salpicadero de un vehículo que circule por carreteras cordobesas en verano. La película de fluido que forma el cojinete no debe rigidizarse demasiado bajo un frío extremo, porque el motor es incapaz de generar el par de fuerzas necesario para vencer esa resistencia. A temperaturas elevadas, el líquido no debe hacerse tan sutil que las piezas móviles lleguen a tocarse y se dañen.

➤**FISICA**: Los teléfonos móviles y los buscapersonas emplean un motor vibrador para indicar la entrada de una señal cuando el timbre está desconectado. Esos pequeños motores tienen el aspecto de pilas botón. La corriente entrante interactúa con los campos magnéticos de los imanes permanentes del motor, provocando la vibración del cárter.

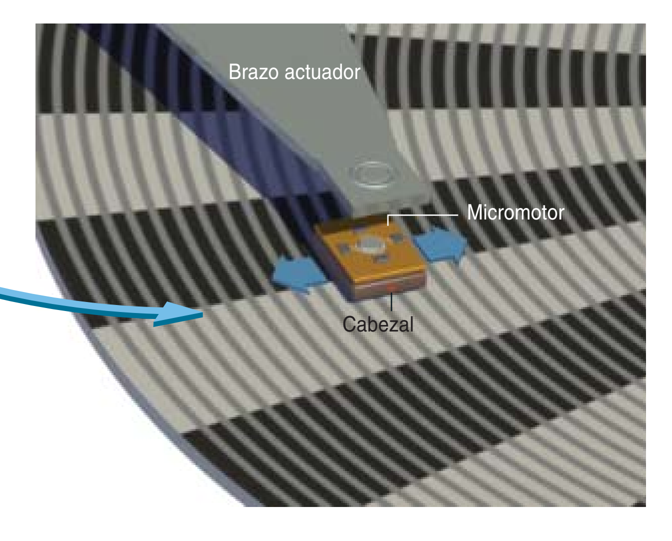


4. LOS MATERIALES DE LOS MOTORES piezoeléctricos cambian de forma. Los campos eléctricos causan la deformación en precesión de las bandas cerámicas externas, a la manera del aro que sube y baja girando en torno a un torso. Roscas interiores hacen entrar y salir un tornillo cerámico, acción que sirve para enfocar una lente o bombear un fluido.

2. EL MOTOR DE ARRASTRE corresponde, en general, a un modelo síncrono de imanes permanentes. Los devanados generan un campo magnético en torno a las piezas polares del estator y, por tanto, en cada pieza polar; al moverse, esos campos repelen a los imanes del rotor, que rota y hace girar el árbol. Un microcircuito de ordenador controla la corriente en los devanados.



3. UN MOTOR ACTUADOR suele ser un modelo de bobina de voz. Los imanes crean un campo; la corriente que se envía por la bobina genera una fuerza que hace girar el brazo adelante y atrás, desplazando así el cabezal de lectura.



5. LOS MICROMOTORES se construyen mediante técnicas microelectromecánicas. Los campos eléctricos provocan un ligero desplazamiento adelante y atrás; ello facilita que el cabezal discrimine entre pistas cuya densidad de empaquetamiento impide que el actuador pueda identificarlas.

Ciencia antigua

Un cuestionable milagro griego

PYTHAGORAS. HIS LIFE, TEACHING, AND INFLUENCE, por Christoph Riedweg. Cornell University Press; Ithaca, 2005.

HIPPOCRATES: *ON ANCIENT MEDICINE*. Traducción, introducción y comentarios de Mark J. Schiefsky. Brill; Leiden, 2005. MEDICINE AND PHILOSOPHY IN CLASSICAL ANTIQUITY. DOCTORS AND PHILOSOPHERS ON NATURE, SOUL, HEALTH AND DISEASE, por Philip J. van der Eijk. Cambridge University Press; Cambridge, 2005.

DAEDOMENA. EUCLID'S DATA OR THE IMPORTANCE OF BEING GIVEN. Edición preparada y comentada de Christian Marinus Taisbak. Museum Tusculanum Press; Copenhague, 2003.

En la figura de Pitágoras (c.560-480 a.C.) se compendia buena parte de nuestro conocimiento del mundo clásico. Hitos intelectuales contundentes (su famoso teorema de los triángulos rectángulos) rodeados de un bosque brumoso de leyendas y conjeturas (*Pythagoras. His Life, Teaching, and Influence*). Natural de Samos, de él se cuenta que había descubierto la naturaleza numérica de los acordes fundamentales y trasladado las razones musicales al cosmos, postulando la armonía de las esferas y aplicando la música con fines terapéuticos. Podría haber acuñado las palabras "cosmos" y "filosofía". Viajero empedernido, se escribió que aprendió geometría en Egipto, aritmética en Fenicia y astronomía en Caldea; los propios judíos le enseñarían el arte de interpretar los sueños. Dictó la doctrina de la transmigración de las almas, tesis que justificaría una supuesta defensa de la dieta vegetariana. La leyenda se deleita en un personaje estrafalario, que hablaba con perros, osos y toros. Nos lo pinta también austero e iniciador de una secta cuya forma de vida se regulaba hasta el detalle por normas rituales. Christoph Riedweg pone orden y jerarquía, a través de una revisión exhaustiva de las fuentes y de una exposición rigurosa del contexto en que pudo desenvolverse Pitágoras, al que se considera con plena justicia un pensador genial y determinante de la historia de Occidente. Tal influencia vino mediada por su ulterior fusión con el platonismo, auspiciada desde el siglo IV a.C. en la Vieja Academia.

Más distante se mostró Aristóteles, autor de dos obras hoy perdidas, *Contra los pitagóricos* y *Sobre las opiniones de los pitagóricos*. Según lo aportado en otros escritos y, sobre todo, en su *Metafísica*, los pitagóricos del siglo V, en particular del grupo de Crotona, sostenían que los componentes o elementos del número, primordio de las cosas existentes, eran "lo par y lo impar", aquél lo limitado y éste lo ilimitado. Representaban los números por medio de guijarros (*pséphoi*), dispuestos en diversas figuras, entre ellas el cartabón de carpintero (*gnommon*). Con Pitágoras empezó, además, la acústica, elaborada a partir de sus ensayos con los tonos emitidos por una cuerda tensada, que se percibían como armónicos, siempre que las longitudes de la cuerda para dos tonos en cuestión se hallaren en una relación numérica sencilla. En el seno de la secta se abogaba por una Tierra esférica y se comprobó que la raíz cuadrada de dos era un número irracional.

Crotona brilló, sobre todo, por su escuela de medicina. Junto a ella,



1. La importación de los datos en geometría euclídea.

empezaron a emerger, en el inicio del pitagorismo, las de Agrigento, Cirene, Rodas, Cnido y Cos. Es decir, el hipocratismo. Su maestro reconocido, Hipócrates, pertenecía a una generación anterior a la de Platón, quien lo veneraba, sentimiento que compartió Aristóteles. De entre los textos a él atribuidos no ocupa un lugar menor el titulado *Sobre la medicina antigua* (Hippocrates: *On Ancient Medicine*). Antes bien, se trata de un texto clave en la historia del pensamiento griego, cuyo argumento central gira en torno a la naturaleza de la medicina, contra quienes se empeñaban en fundar su praxis sobre principios extraídos de la filosofía natural.

Según parece nació para su difusión oral, para proclamar su tesis ante una audiencia no especializada. Las preguntas directas refuerzan la vivacidad del estilo y sugieren la inmediatez del discurso hablado, con períodos largos, recursos retóricos y ejemplos de la experiencia común, con una metáfora de fácil intelección: la comparación de la cocción con la medicina. El autor del *De vetere medicina,* su denominación latina habitual, domina el estado de ciencia de su tiempo y precedentes, desde Alcmeón de Crotona y, por tanto, la escuela pitagórica, hasta Platón, pasando por Demócrito. Y, por supuesto Empédocles y los sofistas, el blanco de su diatriba.

De vetere medicina debió de escribirse entre el 440 y el 350 a.C. La referencia a Empédocles (ca. 490-430) del capítulo 20 establece un razonable *terminus post quem*. Sin indicio tan sólido para su *terminus ante quem*, parece conveniente, por pruebas indirectas, fijarle una fecha en torno a las postrimerías del siglo V. Las afinidades con Demócrito (*fl.ca*. 420) así como con ciertos tratados hipocráticos sugieren una fecha no muy anterior al 420.

El tratado mantiene evidentes puntos de conexión con otros textos hipocráticos. Con *De Arte* comparte el concepto nuclear de *techne*. Las cuestiones de método centran, en efecto, su atención y explican el ataque contra quienes pretendían sistematizar la medicina mediante la reducción de la misma a la interacción entre opuestos: caliente y frío, húmedo y seco, factores que desempeñaban un papel importante en buena parte de la filosofía natural griega. Proponían (*hypothese*) los denostados que todas las enfermedades derivaban de la acción de uno o varios de esos factores, que la práctica médica debía circunscribirse a determinar la causa de una enfermedad y que había que prescribir su opuesto para remediarla. Ante tales declaraciones, el autor del *De vetere medicina* responde que la medicina no necesita *hypotheses* de ese tenor cuando dispone ya de una *techne* perfectamente establecida, un arte antiguo y genuino que constaba de un cuerpo de descubrimientos que se habían ido forjando en el curso del tiempo siguiendo un procedimiento metódico.



2. Suerte de ventosa para extraer sangre y otros fluidos corporales.

Nos encontramos, pues, ante la primera prueba de una reacción contra la pretensión de fundar la práctica médica sobre teorías extraídas de la filosofía natural. Constituye, además, el primer empeño de la historia del pensamiento griego de ofrecer una exposición detallada del desarrollo de la ciencia desde un punto de partida asentado en la observación y en la experiencia. Autor y antagonistas tienen una misma concepción de la *techne* (arte, habilidad, ciencia), que remite a un conjunto de procedimientos organizados de una manera sistemática y fundados en el conocimiento de la naturaleza o *physis* del asunto en cuestión En el caso de la medicina, la *techne* requiere conocimiento de la naturaleza (*physis*) del cuerpo humano y de las causas (*aitiai*) de la salud y la enfermedad. Esta concepción de la *techne*, adoptada también por Platón y Aristóteles, se convertiría en objeto de debate entre los médicos racionalistas y los empíricos del período helenista.

Para acotar la noción médica de *techne*, importa saber que, en su origen, se oponía al concepto de *tyche*, azar o suerte. En medicina no ha lugar para la *tyche*, dada la conexión regular entre causa y efecto. Si los fármacos curan, lo harán con o sin suerte. Si se precisara de la suerte, no habría por qué considerarlos fármacos. La idea de que la *techne* aporta control y dominio a través del conocimiento de los nexos causales generales había sido establecida ya en el *De Arte*. En el pensamiento griego el concepto de *techne* se hallaba también estrechamente vinculado al de *akribeia*, exactitud o precisión. Se necesitaba una *techne* para alcanzar *akribeia*. La prosecución de la *akribeia* se asociaba a menudo con mediciones cuantitativas exactas.

La vindicación de la singularidad de la *techne* médica no debe velarnos una realidad cuyos perfiles van apareciendo con nitidez creciente: la estrecha relación entre medicina y filosofía (*Medicine and Philosophy in Classical Antiquity. Doctors and Philosophers on Nature, Soul, Health and Disease*). Los autores hipocráticos, Diocles, Galeno, Sorano y Celio Aureliano, entre muchos, elaboraron sus doctrinas sobre los

Edad de Oro

PRESENT AT THE FLOOD. HOW STRUCTURAL MOLECULAR BIOLOGY CAME ABOUT, por Richard E. Dickerson. Sinauer Associates, Inc.; Sunderland, 2005.

El período cubierto por este libro abarca de 1933 a 1963. A lo largo de ese intervalo, edad de oro de la biología molecular, se resolvieron la estructura y función de las proteínas y la estructura y función del ADN. La nueva disciplina —biología molecular estructural— adquirió su lustre de la pugna librada entre dos laboratorios, el de Linus Pauling y Robert Corey en el Instituto de Tecnología de California en Pasadena y el de Lawrence Bragg en el Cavendish de Cambridge. Desde 1963 la ciencia se ha limitado a cosechar lo sembrado en los tres decenios precedentes.

Sobre las proteínas había mucho por averiguar. ¿Eran compuestos macromoleculares discretos o meras suspensiones coloidales? ¿Poseían pesos moleculares fijos y una composición de aminoácidos definida? ¿De qué modo se engarzaban los aminoácidos componentes? ¿Presentaban las proteínas una secuencia fija o una secuencia aleatoria de aminoácidos? ¿Adquirían plegamientos específicos? ¿En qué consistían los mecanismos enzimáticos?

No era menor el misterio que rodeaba a la naturaleza y misión del ADN.¿Cómo se engarzaban los nucleótidos en la cadena de ADN? ¿Se seguía un orden de bases aleatorio o iterativo? ¿Se hallaba predeterminada la secuencia? Si lo estaba, ¿con qué finalidad? ¿Era racional atribuirle a una molécula de cuatro símbolos el carácter de depositario de la información genética cuando las proteínas contaban con un repertorio de veinte unidades distintas?

Si uno hojea los textos de bioquímica del primer tercio del siglo XX, se sorprenderá del papel central de la química coloidal. Un coloide, *sensu stricto*, no es una sustancia, sino un estado intermedio entre líquido y sólido o cristalino. Se daba tal nombre (tomado del vocablo griego que designa una materia pegajosa) a la gelatina, dextrina, proteínas, gomas y demás suspensiones "coloidales" en agua. Contraponíanse a los "cristaloides" (sacarosa, glucosa, cloruro sódico y otras sales), pequeñas moléculas discretas que podían cristalizar fuera de la solución. La sustancia que se dispersa en una solución coloidal no era considerada una molécula discreta, químicamente definida, sino un agregado, una *fase discontinua* o *micela*; el medio circundante se denominaba *fase continua* o *líquido intermicelar*. Los sistemas más caros a los bioquímicos eran las suspensiones coloidales líquido en líquido y sólido en líquido. Creíase, en efecto, que describían proteínas en solución.

La "biocoloidología" empezó a tambalearse en 1926, con la cristalización de la enzima ureasa por J. B. Sumner. La comunidad bioquímica se sintió desconcertada. ¿Cómo podía ser que un agregado heterogéneo cristalizara? Existen dos tipos de proteínas: globulares y fibrosas. Las enzimas, anticuerpos, portadores de oxígeno, proteínas de transferencia electrónica y muchísimas proteínas más son globulares. Cada una posee su propia secuencia de restos aminoacídicos genéticamente determinada, unidos en una o varias cadenas polipeptídicas, que se pliegan en un metabolito funcional de la maquinaria celular. Aunque estas fueron las proteínas que resultaron catastróficas para la teoría de los coloides, las primeras estructuras proteínicas en ser establecidas fueron las fibrosas, que incluyen, entre otras, el pelo, la lana, la miosina muscular, el fibrinógeno, la seda y el colágeno. Si tensamos una fibra proteica, y si la atraviesa perpendicularmente un haz de rayos X, esta radiación se difractará o dispersará y producirá un patrón sobre una placa fotográfica que nos puede revelar, en principio, la estructura de las fibras dispersantes.

El abanderado de la difracción de las fibras era William T. Astbury, de la Universidad de Leeds. Con otros investigadores, estableció dos clases principales de proteínas fibrosas: los colágenos (incluidas la elastoidina y la gelatina) y el grupo de la queratina-miosina. Este último comprendía proteínas de estructura y función diversas: queratinas procedentes del pelo, las uñas, los cuernos y plumas, miosina procedente del músculo, epidermina, fibrinógeno y fibroína de la seda y otros filamentos de los insectos. Las queratinas producían lo que Astbury denominó el patrón alfa de rayos X, mientras que la fibra de la seda y otras fibras de insectos originaban un patrón distinto, el beta. Ahora bien, si las fibras de queratina se tensaban, el patrón cambiaba de la forma alfa a la forma beta, para tornar a la forma original cuando cesaba la tensión. Era razonable concluir que las proteínas fibrosas se construían a partir de cadenas extendidas de polipéptidos forjadas con la unión entre sí de aminoácidos.

Pero, ¿incidía esto en las proteínas globulares que acababan de cristalizar? ¿También estaban ellas constituidas por largas cadenas polipeptídicas? Después de todo, ¿cómo podríamos cristalizar un manojo ilimitado de fibras? En apoyo de esta idea vino el descubrimiento de que algunas proteínas podían degradarse o desnaturalizarse mediante disolventes orgánicos, y las cadenas desnaturalizadas se arrastran en forma de fibras que ofrecen un patrón beta de difracción. Sin duda, las estructuras de las proteínas fibrosas y globulares debían estar emparentadas. Con otras palabras, las proteínas globulares estarían también constituidas por largas cadenas polipeptídicas, plegadas, que se disgregarían en el proceso de desnaturalización.

Dorothy Wrinch propuso que los bucles de Astbury se cerraban mediante enlaces covalentes. Para ella, los "anillos ciclol" encerraban la clave de la estructura de las proteínas, no las cadenas polipeptídicas lineales. Podíamos construir anillos cerrados planos de un patrón multihexagonal, que contenían 2, 6, 18, 41, 66... (18+24n) aminoácidos; tal debería ser, declaraba, el esquema general de las proteínas fibrosas. En 1937, Wrinch extendió su modelo a las proteínas globulares. Propuso que las láminas se plegaban para formar cajas tridimensionales poliédricas complejas.

Las ideas de Wrinch fomentaron una animada disputa, entre partidarios y oponentes. Entre los segundos, Linus Pauling y Carl Nieman, del Instituto de Tecnología de California, quienes en 1939 publicaron un artículo, "The Structure of Proteins", contra la teoría del ciclol. Fundaban su argumentación en cálculos termodinámicos de las energías de enlace.

Pauling no era ningún advenedizo. Tras una estancia en el laboratorio de Arnold Sommerfeld en Múnich en 1926-27, con visitas esporádicas a Born, Heisenberg y Oppenheimer en Göttingen y a Bohr en Copenhague, Pauling volvió a los Estados Unidos con una misión: situar la teoría del enlace químico sobre una base mecánico-cuántica racional. En 1931 comenzaron a aparecer una serie de

métodos filosóficos de la explicación causal, definición y división, y aplicaron la noción filosófica de naturaleza a su comprensión del cuerpo humano. Una interacción que se encarnaba en las relaciones cuerpo-alma, claves en los apartados del conocimiento, sueño (fisiológico) y ensoñación (sueños), dieta y fármacos.

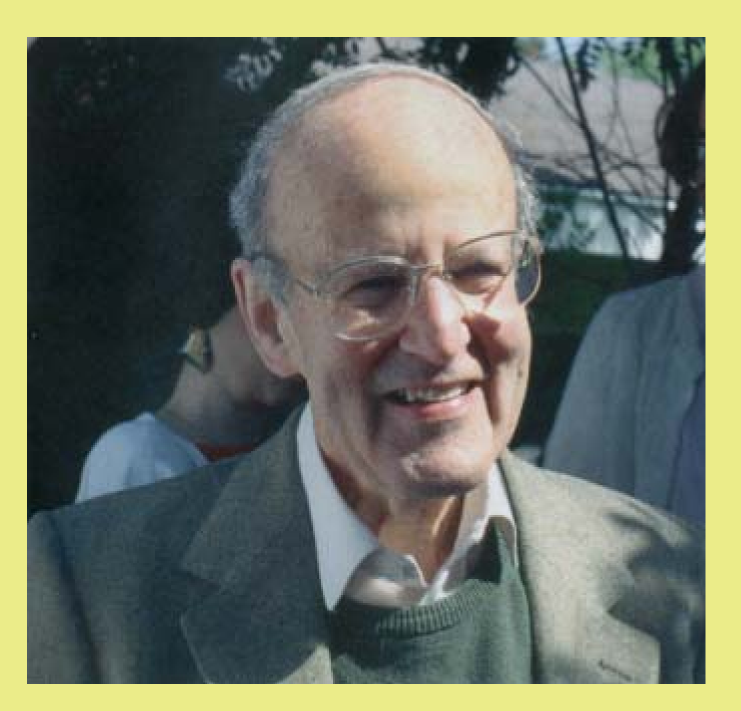
Desde hace treinta años venimos asistiendo, en el estudio de la ciencia clásica, a un cuestionamiento de lo que proclamó el *milagro de la ilustración*: una suerte de repentino despegue de la civilización griega emergido por ensalmo de un trasfondo de barbarie. Habría abarcado todos los campos de la creatividad, de la literatura y las artes a la filosofía y la medicina, pasando por

artículos con “The Nature of Chemical Bond”, que culminaron en un libro del mismo título en 1939, que definirían a su autor como el líder de las teorías sobre el enlace químico. Uno de los conceptos nucleares de Pauling era el de la estabilidad extra conferida a una molécula en virtud de lo que él llamaba “resonancia”, que puede considerarse una suerte de deslocalización de algunos de los electrones de valencia.

En 1935 se avanzaban nuevos pasos con la cristalización de enzimas digestivas (pepsina, tripsina y quimotripsina). Era llegado el momento, decidió J. D. Bernal, del Cavendish de Cambridge, de abordar las proteínas cristalinas con difracción de rayos X. Se rodeó de un equipo joven, tan extraordinario cuan exiguo: Dorothy Crowfort, Max Perutz e Isidore Fankuchen. Los primeros ensayos resultaron frustrantes, hasta que se cayó en la cuenta de que los cristales de proteína debían sellarse en capilares, para que no se secaran. Los cristales húmedos y bien protegidos de numerosas proteínas rindieron unos magníficos patrones de rayos X. Dorothy Crowford llegó al laboratorio como estudiante graduada en 1933 y Max Perutz en 1936. Crowford escogió inicialmente trabajar sobre pepsina y luego sobre insulina. Perutz optó por la hemoglobina. El progreso fue lento, los patrones de difracción resultaban muy pobres, hasta que se percataron de que los cristales de proteína tenían alrededor de un 50 por ciento de disolvente acuoso y debía protegerse contra la deshidratación. Los cristales sellados dentro de capilares Lindemann ofrecieron excelentes patrones que se extendieron hasta el punto de pensar en la posibilidad de un análisis atómico completo de la estructura de la proteína (con permiso de Pauling). En 1937 a Bernal le sustituye William Lawrence Bragg, que había ganado con su padre el Nobel por inventar el análisis de las estructuras cristalinas mediante rayos X. Terminada la segunda guerra mundial John Kendrew se agregó al grupo. El equipo formado por Bragg, Perutz y Kendrew iba a revolucionar nuestro conocimiento de la estructura de las proteínas.

En Cambridge, el trío se embarcó en un análisis exhaustivo de todas las hélices posibles que pudiera adoptar una cadena polipeptídica, sirviéndose de las longitudes de enlace y ángulos establecidos con la máxima precisión. Consideraron varios tipos de hélices, todas ellas estabilizadas por enlaces de hidrógeno entre grupos C=O y H–N. Contemporáneamente, Pauling, ocupado en idénticos problemas, dejaba de lado los patrones de difracción de rayos X. Con papel y lápiz, se distraía cierta noche de insomnio, durante una breve estancia en Oxford, esbozando una cadena polipeptídica extensa con todos los enlaces N–H apuntando hacia abajo y todos los grupos C=O señalando hacia arriba. Enrolló el papel en un cilindro para ver si podía poner los grupos N–H sistemáticamente cercanos de los grupos C=O en el giro siguiente de la hélice. Los únicos supuestos de Pauling sobre la hélice alfa eran: 1) los enlaces de hidrógeno debían ser rectos y tender un puente entre un giro de la hélice y otro; 2) todos los enlaces de hidrógeno debían apuntar en la misma dirección a lo largo de la hélice; 3) cada grupo N–H y C=O debía implicarse en ese enlace; 4) los enlaces amida entre aminoácidos deberían ser planares. El resultado era una hélice con 3,7 aminoácidos por giro —hoy se cifra en 3,6— o en una rotación de 100 grados de un resto al siguiente.

El grupo de Cambridge perdió la carrera por llegar primero al descubrimiento de la hélice alfa debido a un sesgo de formación: Bragg, Kendrew y Perutz dominaban la cristalografía de rayos X y estaban acostumbrados a trabajar con cristales, no con fibras. En un cristal genuino, si una hélice cursa a través de una serie de celdas unitarias idénticas, entonces debe ella repetirse un número entero de veces por vuelta, de suerte que cada celda unitaria sea como las demás. Fue su competencia científica en el análisis de la estructura de cristales individuales lo que les indujo a dejar de lado hélices con números no enteros de residuos por giro.



En 1959 Max Perutz (*foto*) y John Kendrew consiguieron las primeras estructuras moleculares de una proteína globular.

Sin embargo, en la carrera por la estructura del ADN arribó antes Cambridge. Desde los años veinte se sabía que había dos tipos de ácidos nucleicos, el ARN (con azúcar ribosa) y ADN (desoxirribosa). Creyóse en un comienzo que el ARN era característico de las plantas y el ADN de los animales, lo que era erróneo. Igualmente erróneo y peligroso era la así llamada “hipótesis tetranucleotídica”, que consideraba el ácido nucleico como una repetición estéril de la misma secuencia de cuatro bases (A-T-C-G).

Conocida es la historia del descubrimiento de la estructura del ADN por Watson y Crick. Se sabe también que se apoyaron en las bellísimas fotos de la difracción tomadas por Rosalind Franklin y Maurice Wilkins, del King’s College. Se ha reproducido en todos los medios el famoso artículo de número de *Nature* del 25 de abril de 1953. Menos conocido es que dos años antes habían propuesto una triple hélice con un espinazo de azúcar-fosfatos en el interior, mantenido por atracciones electrostáticas entre fosfatos ionizados y átomos de sodio, y con bases en el exterior de una molécula cilíndrica. Suele omitirse la rechifla de los investigadores del King’s College al contemplar tales modelos, hasta el punto de que Bragg les prohibiera a Watson y Crick seguir con el ADN. Suelen omitirse muchos detalles importantes más.

—Luis Alonso

la misma política (democracia). La racionalidad, en breve, suplantó al mito y la magia. Una racionalidad, proseguía el guión admitido, de la que nosotros seríamos los últimos beneficiarios en una secuencia lineal. En el caso de la medicina, la tesis se ilustraba con las historias clínicas de las *Epidemias* de Hipócrates, el rechazo de explicaciones ultraterrenas en *Sobre la enfermedad sagrada*, o la búsqueda de causas naturales y empíricamente observables en el comentado *Sobre la medicina antigua*. O, en el terreno de los valores morales, los criterios éticos defendidos en el *Juramento*. Predominaba lo que se ha dado en llamar teleología progresiva, vale decir, el relato de una sucesión de avances incesantes, desde la descripción tucidídea de la



3. Hipócrates. Manuscrito de la Biblioteca Laurenziana, Florencia.

peste de Atenas o la acotación del fluido nervioso.

Pero esa visión se cuarteó en cuanto comenzaron a salir a la luz antecedentes en el Próximo Oriente y Egipto. Y, sobre todo, en cuanto se empezaron a identificar debilidades supersticiosas y mágicas.

Y caeríamos en anacronismo si repitiéramos la socorrida partición entre "científicos" y "filósofos", como si fueran representantes de dos mundos complementarios, sin zonas de intersección. Empédocles, Demócrito, Parménides, Pitágoras, Filolao, Platón, Aristóteles, Teofrasto, Estratón, Sexto Empírico, Alejandro de Afrodisias, Nemesio de Emesa y Juan Filopón se ocuparon de la anatomía y la fisiología del cuerpo humano, enfermedades mentales, embriología y reproducción, juventud y envejecimiento, respiración, pulso y fiebres, etiología y pronóstico, dieta y terapéutica. Celso declaraba, en el siglo I d.C., que el interés científico por la salud y la enfermedad nació a la sombra de la filosofía. Por especificar algunos ejemplos.

No es exagerado afirmar que la historia de la ciencia en general, y de la medicina en particular, hubiera sido muy distinta sin el determinante impacto de la filosofía de Aristóteles, objeto del grupo central de artículos del libro de Van der Eijk (quien consagra la primera parte al corpus hipocrático y Diocles de Caristo, para dedicar la tercera gavilla a Galeno y Celio Aureliano). El estagirita y su escuela realizaron o posibilitaron avances decisivos en el campo de la anatomía comparada, fisiología, embriología, patología, terapéutica y farmacología. Aportaron un marco teórico y coherente del cuerpo humano, su estructura, sus obras, sentimientos y reacciones ante el alimento, la bebida, fármacos y entorno. El alcance de su enfoque médico aparece incluso reflejado en contextos alejados de la fisiología, verbigracia, en sus textos sobre la melancolía, la percepción, la memoria, el pensamiento, la imaginación, el deseo, el sueño y los sueños.

Lo que Aristóteles supuso para la ciencia y la filosofía occidentales, tuvo su contrapartida matemática en Euclides, que floreció en torno al 300 a.C. (*Euclid's Data*). En una pieza académica modélica de historia del análisis geométrico griego, Taisbak aporta un extenso comentario, fruto de tres decenios de intensa dedicación, sobre el desarrollo de 94 proposiciones de apariencia elemental. Los *Data* demuestran que, si en una figura se conocen (se dan) algunos elementos, ello implica que vienen dados también otros factores, vale decir, quedan determinados. Lo mismo que Aristóteles, también recopiló, colacionó y extendió el saber del mundo antiguo. Le confirió forma sistemática con sus propios resultados en los 13 libros de sus *Elementos de geometría*.

Ante la parvedad de fuentes, suele subrayarse una supuesta réplica a Ptolomeo Sóter, rey de Egipto, cuando éste le solicitó un curso de instrucción fácil: "En geometría no hay caminos trillados para los reyes". Buscó, ante todo, el rigor de la deducción. Cada teorema se basaba en uno precedente hasta remontarse a un conjunto de axiomas autoevidentes. Un estilo de pensamiento que se convirtió en canónico para los matemáticos. Seis de los capítulos de los *Elementos* abordan la geometría plana, cuatro se ocupan de la teoría de números (incluida una prueba de que el número de primos es infinito) y tres más abordan la geometría sólida, incluidos los cinco sólidos platónicos (tetraedro, octaedro, cubo, icosaedro y dodecaedro). Sistema que perdurará hasta el siglo XIX.

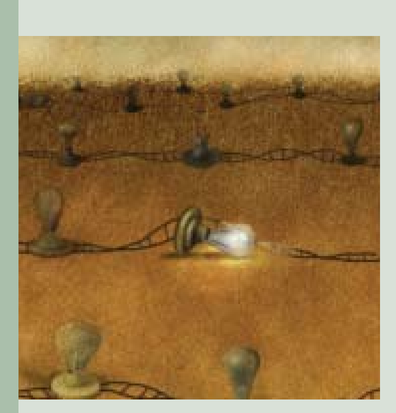
—LUIS ALONSO





MENTES EXPERTAS, por Philip E. Ross

La investigación en torno a los procesos mentales de grandes maestros de ajedrez nos acerca a la maestría que se alcanza también en otros campos.



PSEUDOGENES, por Mark Gerstein y Deyou Zheng

La historia de estas reliquias moleculares repartidas por el genoma humano no deja de sorprendernos.



EL CLIMA Y LA EVOLUCION DE LAS MONTAÑAS, por Kip Hodges

Nuevos estudios realizados en el Himalaya y el altiplano del Tibet sugieren una estrecha relación entre el clima y la tectónica.

LECTINAS, por Francisca Gallego del Sol, Celso S. Nagano, Benildo S. Cavada, Alexandre H. Sampaio, Libia Sanz y Juan José Calvete

Encargadas de descifrar los códigos relativos a los glúcidos, las lectinas se caracterizan por su exquisita selectividad, lo que las convierte en valiosas herramientas bioquímicas.

LOS PECES Y EL BOSQUE, por Scott M. Gende y Thomas P. Quinn

Los osos que pescan salmones fertilizan los bosques con los restos de su alimento preferido.

